

# Auslegung und Charakterisierung nichtlinearer Feldsteuermaterialien für kompakte Gleichspannungsisoliersysteme

**Design and Characterization of Nonlinear Field Grading Materials for Compact DC Insulation Systems**

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Maximilian Secklehner aus Hanau

Tag der Einreichung: 05. Dezember 2018, Tag der Prüfung: 16. Mai 2019

Darmstadt — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fachbereich Elektrotechnik  
und Informationstechnik

Institut für Elektrische Energiesysteme  
Fachgebiet Hochspannungstechnik

Auslegung und Charakterisierung nichtlinearer Feldsteuermaterialien für kompakte Gleichspannungsisoliersysteme

Design and Characterization of Nonlinear Field Grading Materials for Compact DC Insulation Systems

Genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Maximilian Secklehner aus Hanau

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen

2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger

Tag der Einreichung: 05. Dezember 2018

Tag der Prüfung: 16. Mai 2019

Darmstadt — D 17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-90743

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/9074>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen 4.0 International

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



---

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachgebietes Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Ich möchte zuallererst Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen ganz besonders danken, für die Chance am Fachgebiet arbeiten zu können, für das Ermöglichen der vorliegenden Arbeit und für viel entgegengebrachtes Vertrauen. Ebenfalls bin ich sehr dankbar für die Betreuung und die fachlichen Diskussionen, die fortwährend meine Forschungsarbeit unterstützt und vorangetrieben haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Josef Kindersberger danke ich für die Übernahme des Koreferates, den wertvollen Austausch über die gesamte Projektphase hinweg, sowie die Anregungen zur Verbesserung während der finalen Phase der Arbeit.

Meinen Projektpartnern der Firma Siemens AG möchte ich an dieser Stelle für die langfristige Unterstützung in Form von Prüfgut, vielen fruchtbaren Diskussionsrunden und der finanziellen Absicherung des Projekts danken. Für die langjährige, gute Zusammenarbeit sei besonders Herrn Karsten Juhre, Herrn Dr.-Ing. Bernhard Lutz, Frau Dr.-Ing. Maria Kosse und Herrn Dr.-Ing. Michael Tenzer gedankt. Herrn Dr.-Ing. Michael Tenzer danke ich weiterhin für die Einarbeitung in das Thema, für viele wertvolle Ratschläge und die gute Zusammenarbeit während unserer gemeinsamen Zeit am Fachgebiet.

Für diese Arbeit wurde Prüfgut durch die ABB Schweiz AG und durch die Merck KGaA durch Herrn Michael Hagemeister und Herrn Dr. Johann Bauer zur Verfügung gestellt, wofür ich mich an dieser Stelle bedanken möchte. Weiterhin möchte ich Herrn Dr. Johann Bauer und seinem Team für die intensive Zusammenarbeit sowie die Bereitstellung von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen und Messdaten danken.

Herrn Dr. Peter Keil vom Fachgebiet Nichtmetallisch-Anorganische Werkstoffe der TU Darmstadt möchte ich ebenfalls für das Ermöglichen vieler Rasterelektronenmikroskopaufnahmen danken. Für die Dichtebestimmung von pulverförmigen Werkstoffen sei an dieser Stelle Frau Gabriela Schubert und Herrn Christoph Drefke vom Institut für angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt gedankt.

Die vorliegende Arbeit wäre nicht möglich gewesen ohne den Aufbau mehrerer Versuchsstände und das Anfertigen vieler Prüflinge. Hierfür möchte ich dem Team der Werkstatt des Fachgebietes meinen Dank aussprechen, ganz besonders Herrn Ulrich Veith und Herrn Christian Homa für den unermüdlichen und teilweise sehr kurzfristigen Einsatz beim Herstellen der Epoxidharzprüflinge. Für die Beratung beim Aufbau der Versuchsstände und den Aufbau vieler Spannungsquellen möchte ich dem Laborleiter, Herrn Dr.-Ing. Thomas Wietoska, danken.

---

Für viele rege Gespräche, gute Zusammenarbeit, inspirierende Kaffeerunden, kollegiale Unterstützung bei der täglichen Arbeit und der Organisation meiner Verteidigung möchte ich mich bei meinen gesamten ehemaligen Kolleginnen und Kollegen bedanken. Ein besonderer Dank geht dabei an Herrn Rashid Hussain, Frau Dr.-Ing. Maïke Bröker, Herrn Dr.-Ing. Moritz Gießel, Herrn Jens Löwe und Herrn Henning Janssen für die Zeit, die sie sich genommen haben um mein Manuskript zu lesen, oder sich mit mir über nichtlineare Materialien, Isolierstoffe und gute wissenschaftliche Praxis auszutauschen.

Nicht zuletzt wurde diese Arbeit möglich durch viele Studenten, die als HiWis, Abschlussarbeiter, Seminararbeiter und Praktikanten mit Fleiß und Kreativität ihren Teil zur vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Ihnen allen sei an dieser Stelle gedankt.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, für den Rückhalt und die Sicherheit, die es mir ermöglicht haben mein Studium und die anschließende Promotion abzuschließen. Ganz besonders gilt dies für meine Eltern, auf deren Unterstützung ich mich zu jedem Zeitpunkt verlassen konnte.

Für diese Forschungsarbeit wurden Berechnungen am Lichtenberg-Hochleistungsrechner der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>xi</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Feldsteuerung in Hochspannungsisoliersystemen für Gleichspannungen</b>	<b>5</b>
2.1. Ungesteuerte Gleichspannungssysteme . . . . .	5
2.1.1. Vereinfachte Betrachtung der Feldverteilung . . . . .	5
2.1.2. Leitungsmechanismen in festen Isolierstoffen . . . . .	9
2.1.3. Leitungsmechanismen in Gasen . . . . .	12
2.1.4. Leitungsmechanismen entlang von Grenzflächen . . . . .	13
2.1.5. Auswirkung der Leitungsmechanismen auf die Feldverteilung . . . . .	14
2.2. Grundlagen der Feldsteuermaterialien . . . . .	16
2.2.1. Allgemeiner Aufbau von Feldsteuermaterialien . . . . .	17
2.2.2. Funktionelle Füllstoffe für Feldsteuermaterialien . . . . .	19
2.3. Anwendung nichtlinearer Feldsteuermaterialien . . . . .	23
2.3.1. Allgemeiner Einsatz von Feldsteuermaterialien in Gleichspannungssystemen . . . . .	23
2.3.2. Modellierung und Nomenklatur nichtlinearer Kennlinien . . . . .	25
2.3.3. Strategie 1: Feldsteuerung über den gesamten Betriebsbereich . . . . .	27
2.3.4. Strategie 2: Reduktion der Ladungsträgeransammlung . . . . .	29
<b>3. Motivation und Ziele der Arbeit</b>	<b>31</b>
<b>4. Auslegung nichtlinearer Feldsteuermaterialien</b>	<b>33</b>
4.1. Anforderungen an das Beispielsisoliersystem . . . . .	33
4.2. Ermittlung der zulässigen spezifischen Leitfähigkeit im Dauerbetrieb . . . . .	35
4.3. Strategie 1: Einsatz stark nichtlinearer Feldsteuermaterialien . . . . .	44
4.3.1. Auslegung und resultierende Feldverteilung . . . . .	44
4.3.2. Variation der Steigung $m$ der Kennlinie . . . . .	49
4.3.3. Feldrückstoß-Effekt . . . . .	57
4.3.4. Einfluss auf die Prüfung von Betriebsmitteln . . . . .	60
4.3.5. Anforderungskatalog . . . . .	64

4.4. Strategie 2: Einsatz moderat nichtlinearer Feldsteuermaterialien . . . . .	67
4.5. Einsatz von Feldsteuermaterialien als Beschichtung . . . . .	69
4.5.1. Grundlegende Untersuchungen zur Beschichtung von Isolatoren . . . . .	70
4.5.2. Einsatz von nichtlinearen Beschichtungen . . . . .	73
4.6. Steigerung der Resilienz gegenüber Fremdpartikeln . . . . .	79
<b>5. Untersuchte Füll- und Verbundstoffe</b>	<b>83</b>
5.1. Übersicht über die untersuchten Füllstoffe . . . . .	83
5.2. Herstellung und Präparation von Verbundstoffprüflingen . . . . .	85
5.3. Präparation von pulverförmigen Prüflingen . . . . .	87
5.4. Konditionierung . . . . .	88
<b>6. Charakterisierung von Feldsteuermaterialien</b>	<b>91</b>
6.1. Messungen mit Gleichspannung . . . . .	92
6.1.1. Messungen an Verbundstoffprüflingen . . . . .	93
6.1.2. Messungen an pulverförmigen Prüflingen . . . . .	100
6.2. Messungen mit Spannungs- und Stromimpulsen . . . . .	108
6.2.1. Ermittlung der Kennlinie im Durchbruch- und Sättigungsbereich . . . . .	108
6.2.2. Ermittlung der Belastbarkeit bei impulsförmiger Beanspruchung . . . . .	112
6.3. Diskussion der untersuchten Füll- und Verbundstoffe . . . . .	115
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>121</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>127</b>
A.1. Versuchsstand zur Charakterisierung mit Gleichspannung . . . . .	127
A.2. Versuchsstand zur Charakterisierung mit Spannungs- und Stromimpulsen . . . . .	130
A.3. Datenblätter Wacker® AK 5 und Wacker® AK 10 . . . . .	133
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>138</b>
<b>Eigene Publikationen</b>	<b>149</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>151</b>
<b>Erklärungen laut Promotionsordnung</b>	<b>153</b>

# Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

## Liste der Formelzeichen

$A$	$\text{m}^2$	Fläche
$B$	A	materialabhängiger Faktor der General-Response-Funktion
$C$	F	elektrische Kapazität
$C_B$	F	Belastungskapazität (eines Stoßspannungsgenerators)
$C_{\text{Glaet}}$	F	Glättungskapazität (eines Gleichrichters)
$C_S$	F	Stoßkapazität (eines Stoßspannungsgenerators)
$C_{\text{TP}}$	F	Kapazität des Tiefpasses 1
$C_{\text{TP2}}$	F	Kapazität des Tiefpasses 2
$d$	m	Dicke einer Beschichtung
$d_n$	m	Durchmesser von Elektrode $n$
$d_a$	m	Außendurchmesser einer GIL
$d_{\text{Pruefling}}$	m	Prüflingsdurchmesser
$E$	$\text{V m}^{-1}$	elektrische Feldstärke
$E_1$	$\text{V m}^{-1}$	Schaltfeldstärke
$E_{1,\text{max}}$	$\text{V m}^{-1}$	maximal zulässige Schaltfeldstärke
$E_{1,\text{min}}$	$\text{V m}^{-1}$	minimal zulässige Schaltfeldstärke
$E_2$	$\text{V m}^{-1}$	Sättigungsfeldstärke
$E_{2,\text{opt}}$	$\text{V m}^{-1}$	optimale Sättigungsfeldstärke
$E_a$	$\text{V m}^{-1}$	Feldstärke in einem Punkt a auf der Kennlinie
$E_b$	$\text{V m}^{-1}$	Feldstärke in einem Punkt b auf der Kennlinie
$E_{\text{LI}}$	$\text{V m}^{-1}$	Feldstärke während einer Blitzstoßspannungsbeanspruchung
$E_{\text{N}}$	$\text{V m}^{-1}$	Feldstärke im Dauerbetrieb
$E_{\text{ref}}$	$\text{V m}^{-1}$	Bezugsfeldstärke zur Ermittlung der spezifischen Leitfähigkeit
$E_{\text{SI}}$	$\text{V m}^{-1}$	Feldstärke während einer Schaltstoßspannungsbeanspruchung
$E_{\text{tan}}$	$\text{V m}^{-1}$	Tangentialkomponente der Feldstärke entlang einer Grenzfläche
$E_{\text{tan,max}}$	$\text{V m}^{-1}$	Maximalwert der Tangentialkomponente der Feldstärke entlang einer Grenzfläche
$E_{\text{tripel,max}}$	$\text{V m}^{-1}$	Maximalwert der Hintergrundfeldstärke eines Tripelpunktes
$E_{\text{norm,1}}$	$\text{V m}^{-1}$	Normalkomponente der Feldstärke in Medium 1
$h$	$\text{W m}^{-2} \text{ K}$	Wärmeübergangskoeffizient
$I$	A	Strom

$I_{\text{stat}}$	A	stationärer Leitungsstrom
$J$	$\text{A m}^{-2}$	Stromdichte
$k$	$\text{A V}^{-1}$	materialabhängiger Faktor
$k_{\text{B}}$	$\text{eV K}^{-1}$	Boltzmann-Konstante
$L$	H	Induktivität
$l$	m	Länge der auszuwertenden Strecke
$l_{\text{iso}}$	m	Länge eines Isolators
$m$	$\text{m V}^{-1}$	Steigung der Kennlinie in Bereich 2
$m_0$	$\text{m V}^{-1}$	Steigung der Kennlinie in Bereich 1
$m_{\text{El1}}$	g	Masse von Elektrode 1 der PMZ
$m_{\text{opt}}$	$\text{m V}^{-1}$	optimale Steigung der Kennlinie in Bereich 2
$m_{\mu\text{Var,a}}$	$\text{m V}^{-1}$	Steigung der Kennlinie von Mikrovaristorverbundstoff a
$m_{\mu\text{Var,b}}$	$\text{m V}^{-1}$	Steigung der Kennlinie von Mikrovaristorverbundstoff b
$N_1$		Transitionsparameter 1 zur Kennliniennachbildung
$N_2$		Transitionsparameter 2 zur Kennliniennachbildung
$n_1$		materialabhängiger Exponent der General-Response-Funktion
$n_2$		materialabhängiger Exponent der General-Response-Funktion
$p$	$\text{W m}^{-3}$	Verlustleistungsdichte
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$R$	$\Omega$	elektrischer Widerstand
$R_{\text{Beg}}$	$\Omega$	Widerstand zur Begrenzung des Ladestroms
$R_{\text{D}}$	$\Omega$	Dämpfungswiderstand (eines Stoßgenerators)
$R_{\text{E}}$	$\Omega$	Entladewiderstand (eines Stoßgenerators)
$R_{\text{Ent}}$	$\Omega$	Entladewiderstand (eines Erdschalters)
$R_{\text{Entk}}$	$\Omega$	Entkopplungswiderstand (einer Schutzschaltung)
$r_{\text{iso}}$	m	Radius eines einfachen Stützisolators
$R_{\text{TP}}$	$\Omega$	Widerstand des Tiefpasses 1
$R_{\text{TP2}}$	$\Omega$	Widerstand des Tiefpasses 2
$R_{\text{V}}$	$\Omega$	Vorwiderstand
$RH$	%	relative Luftfeuchte
$T$	K	absolute Temperatur
$T_{\text{a}}$	s	Anstiegszeit eines Impulses
$T_{\text{aLI}}$	s	Anstiegszeit eines Blitzstoßspannungsimpulses
$T_{\text{aSI}}$	s	Anstiegszeit eines Schaltstoßspannungsimpulses
$t$	s	Zeit
$U$	V	Spannung
$U_{\text{d0}}$	V	Wert der 0-%-Durchschlagspannung
$U_{\text{DC}}$	V	in der Simulation angelegte Gleichspannung
$U_{\text{LI}}$	V	Scheitelwert der Blitzstoßspannung
$U_{\text{nDC}}$	V	nominelle Betriebsgleichspannung
$U_{\text{rDC}}$	V	zulässige Betriebsdauergleichspannung

$U_{\text{rwDC}}$	V	geforderte Stehgleichspannung
$U_{\text{SI}}$	V	Scheitelwert der Schaltstoßspannung
$\nu$	$\text{m s}^{-1}$	Geschwindigkeit
$w_{\text{auf}}$	$\text{J m}^{-3}$	spezifisches Energieaufnahmevermögen
$w_{\text{aus}}$	$\text{J m}^{-3}$	in einem Prüfling bis zum Ausfall umgesetzte Energie, bezogen auf das Prüflingsvolumen
$w_{\text{aus0}}$	$\text{J m}^{-3}$	spezifisches Energieaufnahmevermögen 0-%-Ausfallwert
$w_{\text{aus50}}$	$\text{J m}^{-3}$	spezifisches Energieaufnahmevermögen 50-%-Ausfallwert
$w_{\text{design}}$	$\text{J m}^{-3}$	Auslegungsenergiedichte
$w_{\text{max}}$	$\text{J m}^{-3}$	maximale spezifische im Isolator umgesetzte Energie
$w_{\text{max,a}}$	$\text{J m}^{-3}$	maximale spezifische im Isolator umgesetzte Energie, Material a
$w_{\text{max,b}}$	$\text{J m}^{-3}$	maximale spezifische im Isolator umgesetzte Energie, Material b
$W_{\text{a}}$	eV	Aktivierungsenergie
$x$	m	Position entlang der auszuwertenden Strecke
$\alpha$		Nichtlinearitätsexponent
$\alpha_{\mu\text{Var,a}}$		Nichtlinearitätsexponent von Mikrovaristorverbundstoff a
$\alpha_{\mu\text{Var,b}}$		Nichtlinearitätsexponent von Mikrovaristorverbundstoff b
$\varepsilon$	$\text{As V}^{-1} \text{m}^{-1}$	Permittivität
$\varepsilon_0$	$\text{As V}^{-1} \text{m}^{-1}$	Permittivität des Vakuums
$\varepsilon_1$	$\text{As V}^{-1} \text{m}^{-1}$	Permittivität von Medium 1
$\varepsilon_2$	$\text{As V}^{-1} \text{m}^{-1}$	Permittivität von Medium 2
$\varepsilon_{\text{r}}$		relative Permittivität
$\eta$	%	Spannungsausnutzungsgrad eines Stoßspannungsgenerators
$\eta_{\text{Ep}}$	Pa s	dynamische Viskosität des genutzten Epoxidharzes
$\vartheta$	°C	Temperatur
$\vartheta_{\text{Kapselung}}$	°C	Kapselungstemperatur einer GIL
$\vartheta_{\text{Luft}}$	°C	Temperatur der umgebenden Luft
$\vartheta_{\text{max}}$	°C	maximale Temperatur des Isolatorvolumens
$\vartheta_{\text{mean}}$	°C	mittlere Temperatur des Isolatorvolumens
$\kappa$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische elektrische Leitfähigkeit
$\kappa_0$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Grundleitfähigkeit, spezifische Leitfähigkeit bei $E = 0 \text{ kV/mm}$
$\kappa_{0\text{K}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit bei $\vartheta = 0 \text{ K}$
$\kappa_1$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit von Medium 1
$\kappa_2$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit von Medium 2
$\kappa_{20\text{C}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit bei einer Temperatur von $20 \text{ °C}$
$\kappa_{1000\text{h}}$	$\text{S m}^{-1}$	nach einer Messdauer von 1000 h ermittelte spezifische Leitfähigkeit
$\kappa_{\text{a}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit in einem Punkt a auf der Kennlinie
$\kappa_{\text{b}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit in einem Punkt b auf der Kennlinie
$\kappa_{\text{Coat}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit einer Beschichtung
$\kappa_{\text{Ep}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit des Referenz-Epoxidharzes
$\kappa_{\text{FGM}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit eines Feldsteuermaterials

$\kappa_{\text{Gas}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit des Isoliergases
$\kappa_{\text{GR},1000\text{h}}$	$\text{S m}^{-1}$	durch General-Response-fit ermittelte spezifische Leitfähigkeit nach 1000 h
$\kappa_{\text{Iso,Kabel}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit der Kabelisolierung
$\kappa_{\text{Iso,Muffe}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit des in der Muffe eingesetzten Isolierstoffes
$\kappa_{\text{LI,max}}$	$\text{S m}^{-1}$	maximal zulässige spezifische Leitfähigkeit bei Blitzstoßfeldstärke
$\kappa_{\text{N}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke
$\kappa_{\text{N,max}}$	$\text{S m}^{-1}$	maximal zulässige spezifische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke
$\kappa_{\text{N,min}}$	$\text{S m}^{-1}$	gewünschte minimale spezifische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke
$\kappa_{\text{sat}}$	$\text{S m}^{-1}$	spezifische Sättigungsleitfähigkeit
$\kappa_{\text{sat,min}}$	$\text{S m}^{-1}$	gewünschte minimale spezifische Sättigungsleitfähigkeit
$\lambda_{\text{Backfill}}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	thermische Leitfähigkeit von thermisch stabilisiertem Rückfüllmaterial
$\lambda_{\text{Boden,f}}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	thermische Leitfähigkeit von feuchtem Erdboden
$\lambda_{\text{Boden,t}}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	thermische Leitfähigkeit von trockenem Erdboden
$\lambda_{\text{Fluessigboden}}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	thermische Leitfähigkeit von Flüssigboden
$\rho$	$\text{C m}^{-3}$	Raumladungsdichte
$\sigma$	$\text{C m}^{-2}$	Flächenladungsdichte
$\tau$	s	Relaxationszeitkonstante
$\tau_{\text{trans}}$	s	Transitzeit

---

## Liste der Abkürzungen

---

AC	engl. <i>Alternating Current</i> für Wechselstrom
CvS	Curie-von Schweidler
DC	engl. <i>Direct Current</i> für Gleichstrom
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
FGM	engl. <i>Field Grading Material</i> für Feldsteuermaterial
GIL	Gasisolierte Leitung
GR	General Response
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HVDC	engl. <i>High Voltage Direct Current</i>
MIM	Metall-Isolator-Metall
PMZ	Pulvermesszelle
PVDF	Polyvinylidenfluorid
REM	Rasterelektronenmikroskop
SCLC	engl. <i>Space Charge Limited Current</i> für Raumladungsbegrenzter Ladungstransport
TE	Teilentladung
VPE	Vernetztes Polyethylen



---

# Abstract

At the current state of the art, the calculation of field distributions for DC insulation systems is more complex than for AC systems. On the one hand, the specific electrical conductivity, which governs the field distribution in DC systems, is strongly influenced by ambient conditions. On the other hand, the specific conductivity itself is hard to determine, because it is the result of a multitude of complex charge carrier transport mechanisms. These are not implemented in state of the art simulation tools.

Nonlinear field grading materials can be employed to achieve a defined field distribution and to render the insulation systems more robust against fluctuations of ambient conditions. For the time being, these materials are still rarely used in systems for voltages above 300 kV. One reason may be the risk, which incorrectly dimensioned materials represent. Additionally, there is no consensus on material parameters that should be used to specify nonlinear field grading materials and on how to measure them.

Within the scope of this work, a nonlinear field grading material is designed for an example insulation system – a gas insulated line for 500 kV DC. The positive effect that can be achieved with the designed material is shown by means of field simulations. In addition, the risks that arise due to incorrect dimensioning are presented, and the boundaries of the design space are identified. As a result, concrete specifications for a potential field grading material for the example system are obtained. Further simulations show the feasibility of field grading materials in the form of coatings and the positive effect of achieving a higher resilience against foreign particles.

Besides the design of a field grading material, the measurements necessary for the comprehensive characterization of such a material are introduced. These include measurements with direct current as well as investigations with voltage and current impulses. Another methodical aspect is the measurement of the specific conductivity of filler materials. Even if manufacturers often use these measurements today, they cannot replace measurements on the compounds made from the filler materials. Furthermore, investigations with impulses provide an indication that energy handling capability might be a crucial parameter for nonlinear field grading materials.

The presented measurement methods are used to characterize a multitude of commercially available materials and material prototypes. Whereas none of the materials in question currently fulfills all the requirements as they were defined in the design process, possible options for optimizing them are identified. Some of the suggestions for improving the filler materials were already seized by the manufacturers, resulting in promising advancements.



---

# Kurzfassung

Die Berechnung der Feldverteilung in Hochspannungsisoliersystemen für Gleichspannungen ist nach dem derzeitigen Stand der Technik aufwendiger als bei Systemen für Wechselspannung. Zum einen zeigt die bestimmende Größe, die spezifische elektrische Leitfähigkeit der beteiligten Materialien, starke Abhängigkeiten von den Umgebungsbedingungen. Zum anderen ist sie teilweise schwer zu bestimmen und das Ergebnis komplexer Ladungstransportmechanismen. Diese werden von heutiger Simulationssoftware noch nicht abgebildet.

Nichtlineare Feldsteuermaterialien mit bekannten und kontrollierten Materialeigenschaften können eingesetzt werden, um eine definierte Feldverteilung zu erzielen und die Isoliersysteme robuster gegenüber Schwankungen der Umgebungsbedingungen zu gestalten. Allerdings kommen diese bisher selten in Betriebsmitteln für Systemspannungen über 300 kV zum Einsatz. Eine Ursache kann sein, dass der Einsatz dieser Materialien bei falscher Auslegung auch Risiken birgt. Ebenfalls problematisch ist, dass derzeit die in Datenblättern angegebenen Parameter nicht vereinheitlicht sind, noch die Art und Weise, wie diese bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein nichtlineares Feldsteuermaterial für ein Beispiel-Isoliersystem, eine gasisolierte Leitung für eine Gleichspannung von 500 kV, ausgelegt. Anhand dieser Auslegung wird mit Hilfe von Feldsimulationen aufgezeigt, welche Potentiale zur Verbesserung der Feldverteilung durch den Einsatz eines geeigneten Feldsteuermaterials bestehen. Auch auf die Risiken durch eine falsche Auslegung wird eingegangen und die Grenzen des Auslegungsspielraumes detailliert aufgezeigt. Hieraus resultiert eine konkrete Anforderungsbeschreibung für Feldsteuermaterialien für das Beispiel-Isoliersystem. Weitere Simulationen zeigen, dass sich Feldsteuermaterialien auch als Beschichtung effektiv einsetzen lassen und eine Erhöhung der Resilienz gegenüber Fremdkörpern auf der Isolatoroberfläche bewirken.

Neben der Auslegung des Materials werden auch Messmethoden vorgestellt, die geeignet sind, die relevanten Materialparameter zu ermitteln und damit Feldsteuermaterialien vollständig zu charakterisieren. Hierzu sind Messungen mit Gleichspannung, aber auch mit Spannungs- und Stromimpulsen notwendig. Es wird gezeigt, dass Messungen an Füllstoffen, wie sie heute oft Praxis sind, keinen Ersatz für die Messungen an den daraus hergestellten Verbundstoffen bieten. Die Messungen mit impulsförmiger Belastung geben weiterhin Hinweise darauf, dass das spezifische Energieaufnahmevermögen eine kritische Größe für nichtlineare Feldsteuermaterialien darstellt.

Mittels der vorgestellten Messverfahren wird eine Reihe der am Markt oder als Prototypen verfügbaren Füllstoffe und Feldsteuermaterialien charakterisiert. Zwar erfüllt noch keines der untersuchten Materialien alle der im Rahmen der Auslegung aufgestellten Anforderungen, es werden jedoch Möglichkeiten zur Weiterentwicklung aufgezeigt. Einige der Verbesserungsvorschläge wurden bereits von den Herstellern aufgegriffen, und die resultierenden Prototypen zeigen vielversprechende Fortschritte.



---

# 1 Einleitung

Unser existierendes elektrisches Wechselspannungsnetz überwindet zwar große Distanzen, dient aber nur begrenzt dem Transport elektrischer Energie. Ursprünglich diente der Zusammenschluss von lokalen Netzen zu einem immer größeren Verbundnetz der Erhöhung der Ausfallsicherheit. Je mehr die Entwicklung weg geht von der klassischen Struktur, Kraftwerke in der Nähe von Ballungs- und Produktionszentren und hin zu dezentralen Erzeugungseinheiten, desto mehr wird das Netz auch zur Übertragung von elektrischer Energie genutzt.

Die Möglichkeit, elektrische Energie über weite Strecken zu transportieren, ist für die Gestaltung der Energieversorgung von großem Wert. Nach dem derzeitigen Stand der Technik stellt die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) die geeignetste Option für diese Aufgabe dar. Die Entwicklungen im Bereich der Halbleitertechnik der letzten Jahrzehnte haben die Technologie für große Distanzen rentabel gemacht. Neuere Entwicklungen im Bereich der Schaltertechnologie könnten es zukünftig erlauben, auch Gleichstromnetze mit mehreren Terminals aufzubauen, was den Ersatz vorhandener Netze ermöglichen würde. [Pie2017]

Bereits heute werden Gleichstromtrassen über große Distanzen gebaut, um dezentral erzeugte Energie zu den Verbraucherschwerpunkten zu transportieren. Ein Extrembeispiel hierfür ist die derzeit im Bau befindliche Leitung zwischen Xinjiang und Anhui in China, mit einer Länge von über 3000 km und einer Betriebsspannung von 1100 kV [Sun2017]. Je zusammenhängender und größer diese Verbindungen werden, desto mehr erlauben sie auch, Fluktuationen der regenerativen Energieerzeugungseinheiten überregional auszugleichen. Damit kann die HGÜ-Übertragung helfen, den weltweiten Anteil an regenerativ erzeugter elektrischer Energie deutlich zu erhöhen und damit den Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase im Energiesektor zu reduzieren. [Pie2017] Speziell aus deutscher Sicht ist die HGÜ-Technologie interessant, um den Transport von Windenergie von Offshorewindparks im Norden zu den energieintensiven Produktionsstandorten im Süden Deutschlands zu ermöglichen.

Obwohl HGÜ-Leitungen bereits weitverbreiteten Einsatz finden, bestehen noch heute Herausforderungen in der Beherrschung und Skalierung der Technologie. Diese liegen nicht nur im Bereich der Konverter oder der Gleichstromschalter, sondern auch in der Zuverlässigkeit der Isoliersysteme von Gleichstromleitungen. Isoliersysteme unter Gleichspannungsbeanspruchung sind im stationären Zustand einem resistiven elektrischen Feld ausgesetzt. Dies bedeutet, dass sich die Feldverteilung nach den im System vorliegenden spezifischen Leitfähigkeiten der Materialien einstellt. Dabei sammeln sich an Materialgrenzen mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften typischerweise Ladungsträger an. Zusätzlich zu dieser Feldverteilung existiert nach dem Einschalten oder nach anderen transienten Ereignissen, wie Überspannungen oder Polaritätswechseln, ein Zustand kapazitiver Feldverteilung, in dem sich die Feldstärke nach den Permittivitäten des Systems verteilt. Der Übergang von der anfänglichen kapazitiven zur resistiven Feldverteilung kann dabei, je nach den genutzten Materialien, einige Minuten bis hin zu mehreren Monaten in Anspruch nehmen. [Kre1995], [Küc2017]

Die erste Herausforderung bei der Auslegung eines Isoliersystems für Gleichspannungsanwendungen besteht also darin, dass es sowohl für die resistive als auch die kapazitive Feldverteilung ausgelegt werden muss. Erschwert wird dies dadurch, dass die kapazitive Feldverteilung bei einer transienten Überspannung durch die im resistiven Feld angesammelten Ladungsträger beeinflusst wird, was oft zu einer schwerer zu beherrschenden Feldverteilung führt [Fuj1989], [Kre1995].

Diese Überlegungen gelten prinzipiell für alle Gleichspannungsisoliersysteme, wobei im Fall von Freiluftisolation die größten Herausforderungen eher im Bereich des geänderten Fremdschichtverhaltens liegen. Zukünftige HGÜ-Leitungen werden allerdings nicht immer in Form von Freilufttrassen ausgeführt werden können, sondern auch unterirdisch und unter Wasser verlegt werden müssen. Beispielfähig könnte die teilweise unterirdische Verlegung die Akzeptanz von Gleichstromtrassen in der Bevölkerung steigern.

Damit rücken Kabel und gasisierte Leitungen immer mehr in den Vordergrund, die zukünftig auch für Gleichspannung eingesetzt werden sollen. Um dies zuverlässig zu ermöglichen, müssen die bereits angesprochenen Herausforderungen für Gleichspannungssysteme überwunden werden, was mit Hilfe von Feldsteuermaterialien bewerkstelligt werden kann. Dabei handelt es sich um Materialien mit speziellen elektrischen Eigenschaften, die geeignet sind, die Verteilung des elektrischen Feldes gezielt zu beeinflussen. Im Fall von Gleichspannungsbeanspruchungen wird als steuernde elektrische Eigenschaft die spezifische elektrische Leitfähigkeit bewusst eingestellt. Diese Materialien können an den neuralgischen Punkten der Systeme, also in den Verbindungsmuffen und Endverschlüssen der Kabel, sowie in den Gießharzisolatoren der gasisierten Leitungen eingesetzt werden, um die Robustheit der Systeme zu gewährleisten. Eine vorrangige Stellung kommt im Rahmen dieser Arbeit den nichtlinearen Feldsteuermaterialien zu, die eine besonders effektive Steuerung elektrischer Felder ermöglichen [Boe2001], [Chr2010].

Allerdings scheiden einige der heute bekannten und bereits gut untersuchten Feldsteuermaterialien als Möglichkeit von vornherein aus, da sie eine zu hohe spezifische Leitfähigkeit aufweisen. Durch die hohen Feldstärken in Kabelgarnituren und gasisierten Systemen würde zu viel Verlustleistung im Feldsteuermaterial umgesetzt, was zu einer kritischen Eigenerwärmung des Isoliersystems führen kann.

Für diese Anwendungen müssen also neue Feldsteuermaterialien und -systeme entwickelt werden. Fortschritte in der Materialwissenschaft lassen es zukünftig möglicherweise zu, Materialien gezielt auf einen Einsatz hin zu entwickeln. Allerdings wird die Entwicklung neuer Feldsteuermaterialien dadurch erschwert, dass die Basis für die Kommunikation zwischen den Materialherstellern und den Isoliersystemdesignern kaum gegeben ist: So existiert keine allgemeine Einigung über die Materialparameter, die zur Beschreibung nichtlinearer Feldsteuermaterialien nötig sind. Die vorliegende Arbeit soll helfen, diese Lücke zwischen der Materialwissenschaft und der Hochspannungstechnik zu schließen und eine, aus Sicht des Anwenders, möglichst genaue Anforderungsbeschreibung für potentielle Hersteller von Feldsteuermaterialien bereitstellen.

Wie im Verlauf der Arbeit gezeigt wird, ist die spezifische elektrische Leitfähigkeit von Feldsteuermaterialien üblicherweise abhängig von mehreren Parametern wie z.B. der Temperatur und der elektrischen Feldstärke. Die Anforderungsbeschreibung muss daher über die Angabe eines konstanten Wertes für die spezifische Leitfähigkeit hinausgehen. Es sollen alle relevanten Parameter aufgezeigt und die Grenzen des Auslegungsspielraumes anhand eines konkreten Beispiels herausgearbeitet werden. Neben der An-

---

forderungsbeschreibung soll auch gezeigt werden, wie die relevanten elektrischen Eigenschaften von Feldsteuermaterialien messtechnisch ermittelt werden können, da auch hierzu bisher keine Norm oder ein allgemein anerkanntes Vorgehen existieren.

Um das Verständnis für die Thematik zu schaffen, werden in Kapitel 2 zunächst ungesteuerte Gleichspannungsisoliersysteme beschrieben und die Herausforderungen herausgearbeitet, um danach die bisher begangenen Lösungswege im Bereich der Feldsteuermaterialien zusammenzufassen. Aus dem dargestellten Stand des Wissens werden in Kapitel 3 die Ziele der Arbeit hergeleitet. Die Anforderungen an die elektrischen Eigenschaften eines Feldsteuermaterials werden in Kapitel 4 ermittelt und das dadurch erstellte Wunschmaterial mit Hilfe von Simulationen auf seine Tauglichkeit hin geprüft. In Kapitel 6 werden die Methodiken der Messungen erklärt, die zur Ermittlung der bereits beschriebenen elektrischen Eigenschaften erarbeitet wurden. Ebenfalls werden an dieser Stelle die an den untersuchten Feldsteuermaterialien ermittelten Materialparameter angegeben und die Einsatzfähigkeit der Materialien diskutiert. Die hierzu genutzten Prüflinge, sowie die zu ihrer Herstellung eingesetzten Füllstoffe sind in Kapitel 5 beschrieben. Abschließend werden die Erkenntnisse der Arbeit in Kapitel 7 zusammengefasst.





---

## 2 Feldsteuerung in Hochspannungsisoliersystemen für Gleichspannungen

Dieses Kapitel erläutert die Grundlagen, die zum Verständnis der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Materialien und Methoden notwendig sind. Hierzu wird zuerst eines der grundlegenden Probleme der Gleichspannungsisolation, die Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von Isolierstoffen von vielen äußeren Einflüssen, aufgezeigt. Als Beispiel dient eine gasisolierte Leitung, deren Untersuchung einen der Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit ausmacht. Anschließend werden die Mechanismen der Leitfähigkeit genauer betrachtet, da diese ebenfalls eine Rolle für die Feldverteilung spielen und die Kenntnis dieser Mechanismen für das Verständnis der später angewandten Messmethodiken von Bedeutung ist. Der zweite Schwerpunkt der Grundlagen widmet sich dem Aufbau von Feldsteuermaterialien, die eingesetzt werden können, um die beschriebene Problematik zu lösen, während im letzten Abschnitt der Einsatz nichtlinearer Feldsteuermaterialien nach dem Stand der Technik erklärt wird.

---

### 2.1 Ungesteuerte Gleichspannungssysteme

---

In einem ungesteuerten Isoliersystem, das ausreichend lange einer Gleichspannung ausgesetzt wird, stellt sich die Feldverteilung nach den Gesetzmäßigkeiten des elektrischen Strömungsfeldes ein. Dies bedeutet, dass die spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten die Feldverteilung bestimmen. Die spezifische elektrische Volumenleitfähigkeit<sup>1</sup> von Isolierstoffen ist allerdings, wie im Folgenden gezeigt werden soll, ein komplexes Zusammenspiel aus mehreren Ladungsträgertransportmechanismen, welches zudem starke Abhängigkeiten von vielen Einflüssen aufweist. Zum Beispiel üben die Temperatur, die Feuchte des Materials, die anliegende elektrische Feldstärke und in manchen Fällen die Vorbelastung einen Einfluss auf die spezifische Leitfähigkeit eines Isolierstoffes aus. Weiterhin unterscheiden sich die spezifischen Leitfähigkeiten unterschiedlicher Isolierstoffe häufig um mehrere Größenordnungen. Im folgenden Absatz wird der Einfluss der Temperatur auf die spezifische Leitfähigkeit isoliert betrachtet, um ein möglichst nachvollziehbares Beispiel bereitzustellen.

---

#### 2.1.1 Vereinfachte Betrachtung der Feldverteilung

---

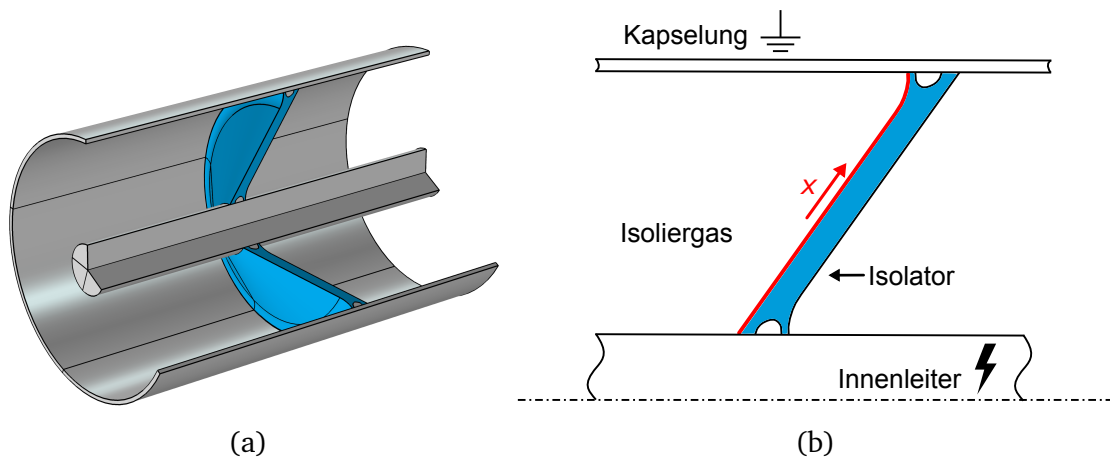
Selbst bei einer einfachen Betrachtung, in der die Prozesse des Ladungsträgertransports in Isolierstoffen als eine zeitunabhängige Größe, die spezifische Leitfähigkeit  $\kappa$ , zusammengefasst werden, können

---

<sup>1</sup> In dieser Arbeit wird für die spezifische elektrische Volumenleitfähigkeit im Folgenden meist kurz *spezifische Leitfähigkeit* geschrieben. Ist die spezifische Oberflächenleitfähigkeit gemeint, wird dies deutlich gemacht. Sind statt der elektrischen die thermischen Eigenschaften eines Materials von Interesse, wird dies ebenfalls deutlich herausgestellt.

bereits die besonderen Herausforderungen der Isolation von Gleichspannungen deutlich werden. Das in diesem Abschnitt behandelte Beispiel orientiert sich am Grundlagenwerk von F. H. Kreuger, allerdings wird der Isolator einer gasisolierten Leitung (kurz: GIL) anstelle einer Kabelisolierung betrachtet [Kre1995].

In einem gasisolierten System, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, lassen sich die Innen- und Außendurchmesser von Kapselung, respektive Innenleiter, so einstellen, dass die Durchbruchfeldstärke des Isoliergases<sup>2</sup> mit ausreichender Sicherheitsmarge unterschritten wird, um einen sicheren Betrieb des Systems zu gewährleisten und auch transienten Überspannungen standzuhalten. Die Isolatoren, welche zum Stützen des Innenleiters oder zum Abschotten von Gasräumen eingesetzt werden, bestehen typischerweise aus einem mit Aluminiumoxid gefüllten Epoxidharz. Dieses weist elektrische Festigkeiten von mehreren zehn kV/mm auf [Kah1989], [Käm2011], [Küc2017], wodurch die Feststoffisolierung bei guter Verarbeitung typischerweise nicht kritisch bei der Auslegung des gasisolierten Systems ist.



**Abbildung 2.1.:** GIL-Isolator (a) Dreidimensionale Darstellung (b) Schematische Darstellung

An der Grenzfläche zwischen Feststoff-Isolator und Gas weist das elektrische Feld eine ausgeprägte Tangentialkomponente auf, was typischerweise eine dielektrisch besonders unvorteilhafte Anordnung darstellt [Küc2017]. Häufig stellt daher nicht der Gasraum oder der Feststoff, sondern die Grenzfläche zwischen Feststoff-Isolator und Gas die Schwachstelle des Isoliersystems dar. Ein typisches Optimierungsziel beim Entwurf von Isoliersystemen ist daher die Minimierung der auftretenden Tangentialfeldstärke entlang von Grenzflächen [Küc2017], wobei die mechanische Funktion ebenfalls gewährleistet bleiben muss.

Im Folgenden werden durch Simulationen ermittelte Feldverteilungen des beispielhaften Isoliersystems gezeigt. Die hierzu durchgeführten Simulationen werden in Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Wird das System mit seiner Betriebsspannung beaufschlagt, stellt sich zuerst eine kapazitive Feldverteilung ein. Die entsprechende Tangentialfeldstärke entlang der konvexen Seite des Isolators ist beispielhaft in Abbildung 2.2 (schwarze durchgezogene Kurve) dargestellt. Die Feldstärke in der Nähe der Tripelpunkte<sup>3</sup> ist

<sup>2</sup> Meist handelt es sich nach dem derzeitigen Stand der Technik um ein Mischgas mit  $\text{SF}_6$ -Anteil, dessen Durchbruchfeldstärke gut bekannt ist. Dies dürfte auch für alternative Isoliergase gelten, deren Einführung derzeit geplant wird (vgl. [Wie2017]).

<sup>3</sup> Dies bezeichnet die Stelle, an welcher der Leiter mit den beiden unterschiedlichen Isolierstoffen – Gas und Epoxidharzformstoff – aufeinandertrifft. Typischerweise ist dies eine besondere Schwachstelle in Isoliersystemen.

durch die eingebetteten Elektroden im Isolator abgesenkt, abgesehen davon tritt die höchste Feldstärke in der Nähe des Innenleiters auf.

Anschließend vollzieht sich der Übergang zum resistiven Strömungsfeld. Die Zeitkonstante, mit der sich dieser abspielt, kann grob durch die Relaxationszeitkonstanten  $\tau$  der beteiligten Materialien abgeschätzt werden (vgl. Gleichung 2.1) [Küc2017]. Zur Berechnung der Zeitkonstante eines Zweischicht-dielektrikums werden in der Literatur mehrere vereinfachte Formeln angegeben (siehe [Küc2017] und [Kre1995]), für komplexere Isoliersysteme kann eine Feldberechnung herangezogen werden. Im vorliegenden Fall stellt sich im stationären Zustand eine Feldverteilung ein, die der kapazitiven Feldverteilung sehr ähnlich ist (blaue durchgezogene Kurve).

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\kappa} \quad (2.1)$$

Dabei ist allerdings zu beachten, dass selbst bei Vernachlässigung der in den Unterkapiteln 2.1.2 bis 2.1.4 beschriebenen Leitungsmechanismen berücksichtigt werden muss, dass die spezifische Leitfähigkeit von Isolierstoffen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Temperatur  $\vartheta$  (bzw. von der absoluten Temperatur  $T$ ) aufweisen kann. Im technisch relevanten Bereich kann die Temperaturabhängigkeit von Isolierstoffen meist mit Hilfe des *Van't Hoff'schen Gesetzes* beschrieben werden (vgl. Gleichung 2.2) [Bey1992]. Typischerweise verzehnfacht sich die spezifische Leitfähigkeit fester Isolierstoffe wenn die Temperatur um 30 K bis 40 K erhöht wird.

$$\kappa(T) = \kappa_{0K} \cdot e^{-\frac{W_a}{k_B \cdot T}} \quad (2.2)$$

$\kappa_{0K}$ : spez. Leitfähigkeit bei 0 K (in S/m)

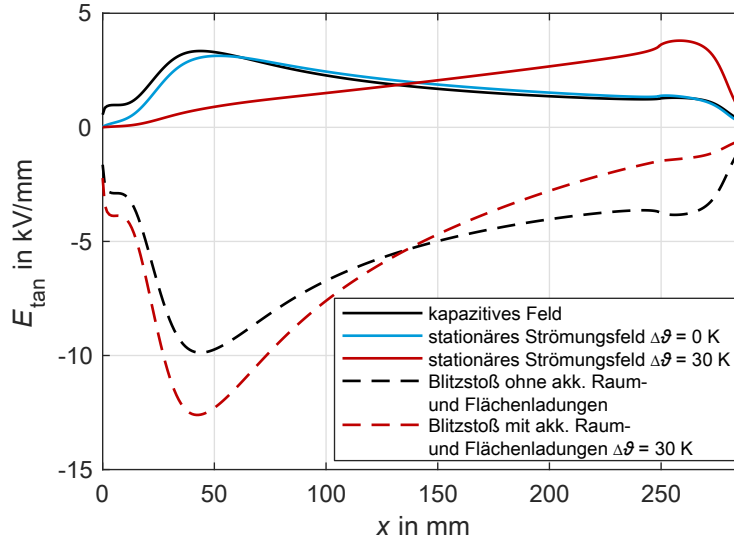
$W_a$ : Aktivierungsenergie (in eV)

$k_B$ : Boltzmann-Konstante (in eV/K)

$T$ : absolute Temperatur (in K)

Durch den Betriebsstrom der Leitung wird der Innenleiter erwärmt, in diesem Beispiel wurde dabei von einem Temperaturgefälle von 30 K zur Kapselung ausgegangen. Die spezifische Leitfähigkeit des Isolierstoffes ist entsprechend in der Nähe des Innenleiters höher, wodurch das elektrische Feld nach außen in den Bereich des kälteren Isolierstoffes verdrängt wird. Im Extremfall kommt es zur sogenannten Feldinversion. Die stationäre Feldverteilung für diesen Fall ist in Abbildung 2.2 (rot, durchgezogen) dargestellt. Die Feldinversion muss, je nach Temperaturgefälle und Geometrie, nicht zwangsläufig zu einer höheren Maximalfeldstärke entlang des Isolators führen. Allerdings zeigt dieses Beispiel bereits, dass durch eine Anpassung der Geometrie alleine keine für beide dargestellten Betriebspunkte optimale Lösung gefunden werden könnte.

Zudem führt die Variation der spezifischen Leitfähigkeit durch das Temperaturgefälle im Isolator zur Akkumulation von Raumladungen im Isolierstoff. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Permittivität üblicher Isolierstoffe nur eine geringe Abhängigkeit von der Temperatur aufweist. Weiterhin gilt nach Gleichung 2.3, dass sich an einer Grenzfläche Ladungen ansammeln, wenn die spezifischen Leitfähigkeiten ( $\kappa_1$  und  $\kappa_2$ ) und Permittivitäten ( $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ ) angrenzender Materialien nicht im gleichen



**Abbildung 2.2.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines ungesteuerten Isolators einer HVDC-GIL bei homogener Temperatur und bei einer Temperaturdifferenz von  $\Delta\vartheta = 30$  K, Blitzstoßspannung gegenpolar zur Betriebsspannung,  $U_{DC} = 550$  kV;  $U_{LI} = -1550$  kV, vgl. Abschnitt 4.3.1

Verhältnis zueinander stehen [Küc2017], [Kre1995]. Dabei bezeichnet  $E_{norm,1}$  die Normalfeldstärke in Bezug auf die Grenzfläche im ersten der beiden Medien.

$$\sigma = E_{norm,1} \cdot \left( \varepsilon_2 \cdot \frac{\kappa_1}{\kappa_2} - \varepsilon_1 \right) \quad (2.3)$$

$$\rho = -\varepsilon E \frac{\nabla \kappa}{\kappa} \quad (2.4)$$

$\sigma$ : Flächenladungsdichte (in C/m<sup>2</sup>)

$\rho$ : Raumladungsdichte (in C/m<sup>3</sup>)

Das einem Temperaturgradienten unterliegende Material kann als eine Aneinanderreihung infinitesimal schmaler Schichten unterschiedlicher spezifischer Leitfähigkeit und gleicher Permittivität aufgefasst werden, wodurch Gleichung 2.3 in Gleichung 2.4 übergeht [Kre1995]. Durch den Leitfähigkeitsgradienten als Folge des Temperaturgradienten wird sich also eine Raumladungsdichte  $\rho$  einstellen. Dies geht Hand in Hand mit dem Übergang zum resistiven Strömungsfeld. Da durch diese veränderte Feldverteilung eine größere Normalfeldstärke entlang des Isolators auftritt, bildet sich wiederum eine größere Flächenladungsdichte  $\sigma$  auf der Isolatoroberfläche aus als im Fall eines homogen temperierten Isolators.

Die akkumulierten Ladungsträger können bei einer Veränderung des extern angelegten Feldes, die sich in deutlich kürzerer Zeit als  $\tau$  abspielt, diesem nicht folgen und bleiben als Quellen und Senken der Verschiebungsdichte im sich einstellenden kapazitiven Feld vorhanden. Kommt es zum Beispiel zu einer transienten Überspannung in Form einer Blitzstoßspannung, deren Polarität der Betriebsspannung entgegengesetzt ist, überlagert sich das elektrische Feld der akkumulierten Ladungsträger dem durch die Spannung an Innen- und Außenleiter vorgegebenen Feld. Dies wäre der Worst-Case, in dem es zu

deutlich höheren Maximalfeldstärken kommen würde als bei einer Blitzstoßspannung ohne vorgeladene Isolatoren. Da durch Blitze hervorgerufene Überspannungen mit einer größeren Häufigkeit eine negative Polarität aufweisen, ist dieser Fall für den positiven Leiter einer HGÜ-Verbindung der vergleichsweise wahrscheinlichere und wird hier dargestellt (vgl. Abbildung 2.2, schwarze und rote strichlierte Kurven).

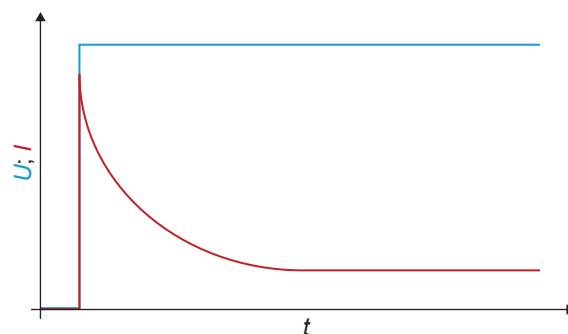
Dieses Beispiel zeigt, dass ein Temperaturgefälle, welches in Betriebsmitteln der Energieversorgung oft nicht zu vermeiden ist, bereits die Auslegung von Gleichspannungsisoliersystemen im Vergleich zu Wechselspannungsisoliersystemen erschwert. In der Realität kommt es bei einer Gleichspannungsbelastung zu deutlich komplexeren Vorgängen, die in den folgenden Abschnitten zusammengefasst werden.

---

### 2.1.2 Leitungsmechanismen in festen Isolierstoffen

---

Der sich nach Anlegen einer Gleichspannung an einen Isolierstoff einstellende Stromverlauf ist die Summe mehrerer Polarisations- und Ladungstransportmechanismen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Typischerweise kann der Isolierstoff nicht alleine betrachtet werden, sondern ist mit metallischen oder zumindest leitfähigen Elektroden kontaktiert. Es handelt sich um ein Metall-Isolator-Metall-System (kurz MIM-System). Wird nun eine Spannung über diese Elektroden angelegt, stellt sich zuerst ein vergleichsweise hoher, jedoch rasch abnehmender Strom ein, wie in Abbildung 2.3 dargestellt (vgl. [Kao2004]). Je nach Material nimmt der Strom immer langsamer ab, bis er sich einem stationären Wert annähert.



**Abbildung 2.3.:** Zeitlicher Verlauf des Stroms durch einen Isolierstoff, hervorgerufen durch einen idealen Spannungssprung

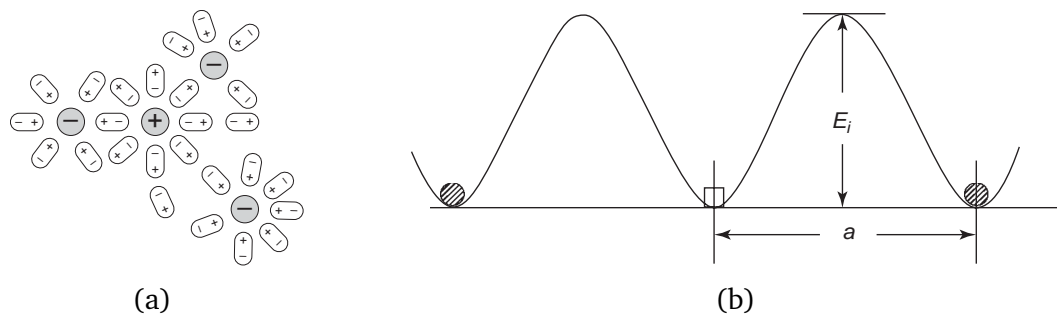
Dieses Verhalten wird in der Literatur vereinfacht durch ein lineares Netzwerkmodell beschrieben. Der Isolierstoff wird dabei durch die Parallelschaltung einer Vakuumkapazität, eines Widerstands und eines oder mehrerer RC-Glieder dargestellt, welche die unterschiedlich schnellen Polarisationsmechanismen im Material nachbilden. Allerdings ist dieses vereinfachte Modell nur für lineare Materialien gut anwendbar [Küc2017].

Die *Polarisation* setzt sich zusammen aus den vergleichsweise schnellen Polarisationsmechanismen, *Elektronenpolarisation*, *Atompolarisation* und *Gitterpolarisation*, welche bis in Frequenzbereiche von mehreren Gigahertz wirksam sind [Küc2017]. Langsamere Polarisationsmechanismen, die in den hier betrachteten Impulsantworten von Feststoffen eine Rolle spielen können, sind die *Orientierungspolarisation* und die *Grenzflächenpolarisation*. Als Orientierungspolarisation wird die Ausrichtung polarer Moleküle bezeichnet, die je nach Molekül und Temperatur unterschiedlich schnell abläuft. Die Grenzflächenpo-

larisation bezeichnet die Ansammlung von Ladungsträgern an makroskopischen und mikroskopischen Grenzflächen und spielt daher in den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Verbundstoffen eine Rolle.

Messungen an realen Isolierstoffen zeigen, dass das lineare Netzwerkmodell für eine präzise Darstellung des Stromverlaufs meist nicht ausreichend ist. Zwar beeinflussen die Polarisationsmechanismen die ersten Sekunden bis Stunden des Stromverlaufs, jedoch vernachlässigt dieses Modell die Bewegung und Ansammlung von Ladungsträgern durch das Gleichfeld im Isolierstoff, welche den langfristigen Stromverlauf (bis hin zu mehreren Monaten) bestimmen [Bey1992].

Einer der vernachlässigten Mechanismen ist die *Ionenleitfähigkeit* von Isolierstoffen. Ein Ion polarisiert durch seine elektrische Ladung die umgebenden Atome oder Moleküle. Der Effekt ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Aus Sicht des Ions muss eine Potentialbarriere überwunden werden, um seinen Gitterplatz zu verlassen. Durch ein anliegendes elektrisches Feld wird die Potentialbarriere jedoch verringert, wodurch die Wahrscheinlichkeit, sie zu überwinden, erhöht wird. [Kao2004]



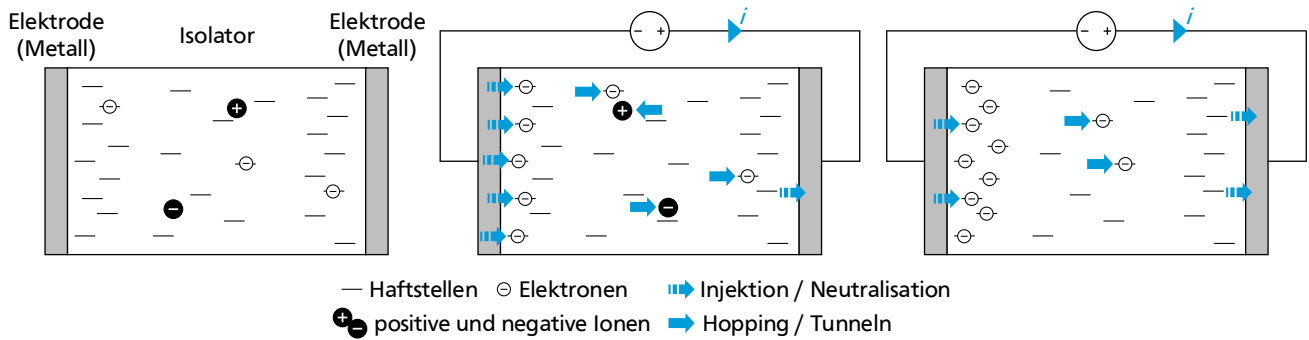
**Abbildung 2.4.:** (a) Schematische Darstellung der Polarisation von Atomen oder Molekülen in der Umgebung von Ionen, (b) resultierende Potentialbarriere zwischen Ion und möglichem Gitterplatz (mit  $E_i$ : zur Überwindung der Potentialbarriere nötige Aktivierungsenergie und  $a$ : Gitterkonstante eines kristallinen Festkörpers), beide [Kao2004]

Man unterscheidet zwischen der *intrinsischen* und der *extrinsischen* Ionenleitung. Bei der Ersteren handelt es sich um die Leitung in kristallinen Festkörpern, welche durch Gitterdefekte<sup>4</sup> ermöglicht wird. Die extrinsische Ionenleitfähigkeit wird hingegen durch ionische Verunreinigungen im Material hervorgerufen. In Isolatoren kann die Absorption von Wasser eine Quelle für Ionen darstellen. [Kao2004]

In Abhängigkeit des Isolierstoffs und der Umgebungsbedingungen wird davon ausgegangen, dass ab Feldstärken von etwa 1 kV/mm ein durch Elektronentransport hervorgerufener Strom dem durch Ionen-transport verursachten Strom überlagert wird [Bey1992]. Neuere Quellen sehen den Strom in polymeren Isolierstoffen sogar hauptsächlich durch Elektronentransport verursacht, solange der Isolierstoff nicht stark verunreinigt ist oder andere ergiebige Ionenquellen vorliegen [Kao2004]. Der Elektronentransport in Isolierstoffen wird, unter anderem, durch die Modellvorstellung des Mechanismus des *raumladungsbe- grenzten Ladungstransports* beschrieben (engl.: *Space Charge Limited Current, SCLC*). Eine vereinfachte Darstellung dieses Mechanismus ist in Abbildung 2.5 skizziert<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Zum Beispiel Frenkel- und Schottky-Defekte, vgl. [Fre1926], [Kit2013]

<sup>5</sup> Die einfache SCLC-Modellvorstellung beinhaltet keine Ionen. Da Isolierstoffe jedoch nur eine *technische Reinheit* aufweisen und zudem Wasser in diese eindiffundieren kann, ist davon auszugehen, dass auch Ionen einen Beitrag zum Stromverlauf liefern. Entsprechend wird auch dieser im Bild aufgezeigt.



**Abbildung 2.5.:** Ladungsträgerbewegung in einem Isolierstoff nach dem Modell des SCLC, links: vorhandene Ladungsträger im Isolierstoff; Mitte: direkt nach Anlegen einer Gleichspannung, Elektronen werden an der Kathode injiziert, Ladungsträger bewegen sich durch Tunneln und Hopping; rechts: Gleichgewichtszustand aus Injektion, Bewegung und Neutralisation

Der polymere Isolierstoff ist durch zwei metallische Elektroden kontaktiert (MIM-System). Im Volumen befinden sich Haftstellen, die von Elektronen besetzt werden können. Bei diesen Haftstellen kann es sich um Defekte in der Polymerstruktur handeln, wie etwa Verunreinigungen, Füllstoffe, Kettenenden, etc. [Bey1992]. Die Anzahl der Haftstellen nimmt dabei zum Rand des Isolierstoffvolumens zu. Bereits vor dem Anlegen der Spannung können Ladungsträger im System vorhanden sein (vgl. Abbildung 2.5 (links)). Wird nun an das MIM-System eine Spannung angelegt, werden aus der Kathode Elektronen in den Isolierstoff injiziert<sup>6</sup>. Gleichzeitig bewegen sich die bereits im Isolierstoffvolumen vorhandenen Ladungsträger durch den Einfluss des elektrischen Feldes im Material fort, wie in Abbildung 2.5 (Mitte) dargestellt ist.

Die injizierten Elektronen werden in den elektrodennahen Haftstellen gefangen und senken das Feld direkt vor der Kathode ab. Die Akkumulation von Raumladungen gleicher Polarität vor einer Elektrode wird in der Literatur typischerweise als *Homocharge* bezeichnet. Die Absenkung des Feldes reduziert die Anzahl der injizierten Elektronen, was das Absinken des Stromes mit der Zeit erklärt (vgl. Abbildung 2.3). Die gefangenen Elektronen (in der Literatur häufig als *trapped charges* bezeichnet) können durch thermische Anregung befreit werden und ins Leitungsband gelangen. Dieser Prozess kann durch ein anliegendes elektrisches Feld begünstigt werden (*Poole-Frenkel-Effekt* [Fre1938]). Da die Bandstruktur eines polymeren Isolators örtlich sehr unterschiedlich sein kann, legen die Elektronen typischerweise nur kurze Teilstrecken zurück, um dann wieder in einer Haftstelle gefangen zu werden. Aus dieser können sie später wieder befreit werden und ein weiteres Teilstück zurücklegen. Die Unregelmäßigkeit dieses Prozesses hat dazu geführt, dass die Leitung von Elektronen in Isolierstoffen häufig mit dem Begriff *Hopping* beschrieben wird [Bey1992]. Ob sich die Elektronen an der Anode ansammeln (respektive die Ionen an der jeweiligen Gegenelektrode) oder dort neutralisiert werden, hängt wiederum von der Kontaktart der Anode ab. Mit der Zeit stellt sich im Isolierstoff ein Gleichgewicht aus injizierten, sich fortbewegenden und neutralisierten Elektronen ein (vgl. Abbildung 2.5 (rechts)), was den stationären Teil des Stromverlaufs in Abbildung 2.3 erklärt. [Bey1992], [Kao2004]. Diese Modellvorstellung wird

<sup>6</sup> Dieser Prozess kann auf verschiedene Weisen ausgeprägt sein, weshalb zwischen unterschiedlichen *Kontaktarten* unterschieden wird. Eine tiefere Betrachtung der Injektionsphänomene kann der Literatur entnommen werden [Kao2004].



---

durch Messungen gestützt, welche die – durch das Modell vorhergesagte – Ansammlung von negativen Raumladungen vor der Kathode bestätigen [Wen2018].

Eine Folge der langen Dauer dieses Prozesses ist, dass die Messung der spezifischen Leitfähigkeit von festen Isolierstoffen nicht innerhalb von kurzer Zeit erfolgen kann, sondern abhängig von den untersuchten Materialien bis zu mehrere Tage in Anspruch nimmt. Allein von einer spezifischen Leitfähigkeit eines Materials zu sprechen, ist bereits eine grenzwertige Vereinfachung, da die Leitfähigkeit innerhalb des MIM-Systems ortsabhängig ist. Weiterhin ist die spezifische Leitfähigkeit keine intrinsische Größe, d.h. sie kann auch abhängig von den beteiligten Elektrodenmaterialien und von der Dicke des Isolierstoffes sein. Feldsteuermaterialien, die in Abschnitt 2.2 genauer beschrieben werden, bilden einen Grenzfall, da sie meist etwas leitfähiger sind als Isolierstoffe und in ihnen einfacher beschreibbare Mechanismen den Ladungstransport dominieren.

---

### 2.1.3 Leitungsmechanismen in Gasen

---

Um den Ladungstransport in Gasen zu beschreiben, müssen die Mechanismen der *Entstehung*, der *Rekombination* und der *Bewegung* geladener Teilchen berücksichtigt werden. Das Zusammenspiel der Mechanismen sorgt dafür, dass die spezifische Leitfähigkeit von Gasen nichtlinear von der elektrischen Feldstärke, aber auch von vielen weiteren Faktoren abhängig ist [Win2015].

Um Atome oder Moleküle zu ionisieren, wodurch Ladungsträger in Gasen entstehen, muss ihnen eine ausreichende Energie zugeführt werden. Diese Energie wird als *Ionisierungsenergie* bezeichnet. Die Zufuhr dieser Energie löst ein Elektron vom Atomkern und bewegt das Elektron soweit von diesem weg, dass keine wechselwirkenden Kräfte mehr zwischen dem nun ionisierten Atom und dem Elektron bestehen. Im Fall von  $\text{SF}_6$  muss beispielsweise eine Energie von 15,6 eV aufgebracht werden, um eine Ionisierung hervorzurufen [Bey1992]. Die benötigte Energie kann dabei durch Strahlung oder Stoßprozesse aufgebracht werden. Zu einer *Stoßionisation* kann es zum Beispiel durch thermische Anregung oder elektrische Felder kommen. Der erste Fall ist allerdings für betriebsrelevante Temperaturen zu vernachlässigen. Eine Stoßionisation durch elektrische Felder im Gasvolumen wird im Fall einer selbstständigen Gasentladung erreicht. Dies sollte in gasisolierten Systemen der Hochspannungstechnik prinzipiell vermieden werden.

*Strahlungsionisation* durch natürliche Strahlung lässt sich hingegen kaum vermeiden und wird durch radioaktiven Zerfall und kosmische Strahlung hervorgerufen [Win2015]. Da diese Prozesse eine starke Ortsabhängigkeit aufweisen, kann die spezifische Leitfähigkeit eines Isoliergases nicht immer vorausgesagt werden und stark schwanken. In Umgebungen mit ausgeprägter radioaktiver Strahlung wird die Auslegung gasisolierter Systeme daher oft besonders herausfordernd, wie etwa im Fall des *Neutral-Beam-Injector-Systems* für den ITER [Lor2009].

Ebenfalls möglich ist die Bereitstellung von Ladungsträgern im Gasraum durch die *Feldemission*. Hierbei handelt es sich um Elektronen, die bei ausreichend hohen Feldstärken aus der Kathode in den Gasraum abgegeben werden, beispielsweise nach dem Prinzip des Fowler-Nordheim-Mechanismus [Fow1928]. Zwar sind hierfür Feldstärken im Bereich von mehr als 100 kV/mm an ideal glatten Elektroden notwendig, allerdings können Mikrospitzen zu einer deutlichen Erhöhung der mikroskopischen Feldstärke führen, wodurch dieser Effekt Beachtung finden muss [Win2015].



---

Nach der Ionisierung lagern sich freie Elektronen in elektronenaffinen Gasen (wie Luft, SF<sub>6</sub>, sowie derzeit untersuchten alternativen Isoliergasen) schnell an Atomen oder Molekülen an, wodurch negative Ionen entstehen. Man spricht daher auch oft von einer *Ionenpaarerzeugung*. Treffen sich zwei unterschiedlich geladene Ionen oder ein Elektron ein positiv geladenes Ion, kommt es zur *Rekombination*, durch die die Ionen ihre Ladung verlieren. Die Rekombinationsrate kann mit Hilfe des sogenannten *Rekombinationskoeffizienten* ausgedrückt werden, der eine Abhängigkeit vom Gasdruck aufweist und für unterschiedliche Gase verschieden ausgeprägt ist [Jun1989].

Die Bewegung von Ladungsträgern im Gas findet vor allem durch *Drift* und *Diffusion* statt. Dabei beschreibt Drift den Anteil der Bewegung, der durch die vom elektrischen Feld hervorgerufene Coulombkraft verursacht wird. Die Diffusion ist eine Bewegung, die aufgrund von Konzentrationsunterschieden der Ladungsträger erfolgt, da die Ionendichte einer homogenen Verteilung entgegenstrebt. [Win2015]

Die beschriebenen Prozesse resultieren darin, dass die spezifische Leitfähigkeit von Gasen, wie auch die von Feststoffen, eine Zeitabhängigkeit aufweist, die nur durch ein dynamisches Gasmodell beschrieben werden kann [Win2015]. Weiterhin ist die resultierende spezifische Leitfähigkeit des Gases feldstärkeabhängig. Solange es nicht zu einer selbständigen Entladung kommt, sinkt die spezifische Leitfähigkeit mit zunehmender Feldstärke, da die Anzahl der generierten Ionenpaare von der Feldstärke unabhängig ist, die erhöhte Feldstärke aber zu einer Verarmung von Ladungsträgern führt. Weiterhin hängt der Ladungsträgertransport in Gasen von vielen Faktoren wie der Hintergrundstrahlung, der Temperatur, der Beschaffenheit der Elektrodenoberflächen und dem Gasvolumen ab. Bei realistischen Bedingungen für gasisolierte Systeme ergeben sich laut Simulation spezifische Leitfähigkeiten von SF<sub>6</sub> zwischen  $1,5 \cdot 10^{-21}$  S/m und  $2,9 \cdot 10^{-19}$  S/m, wobei sich auch höhere Werte einstellen können, wenn es zur Felddemission kommt [Win2015]. In Messungen bei vergleichbar hohen Feldstärken ( $\approx 10$  kV/mm) konnten für SF<sub>6</sub> mit einer relativen Gasfeuchte von 20 % bei einer Elektrodenrauheit von 3  $\mu$ m spezifische Leitfähigkeiten im Bereich zwischen  $10^{-16}$  S/m und  $10^{-13}$  S/m gemessen werden. Dabei wurde auch ein signifikanter Einfluss der Gasfeuchte festgestellt und für Gasfeuchten von etwa 1 % (bei 20 °C) spezifische Leitfähigkeiten von weniger als  $10^{-17}$  S/m gemessen [Zav2014]. Diese Ergebnisse verdeutlichen, wie stark die spezifische Leitfähigkeit von Isoliergasen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen variieren kann und dass es herausfordernd ist alle relevanten Mechanismen in Simulationen zu modellieren.

---

## 2.1.4 Leitungsmechanismen entlang von Grenzflächen

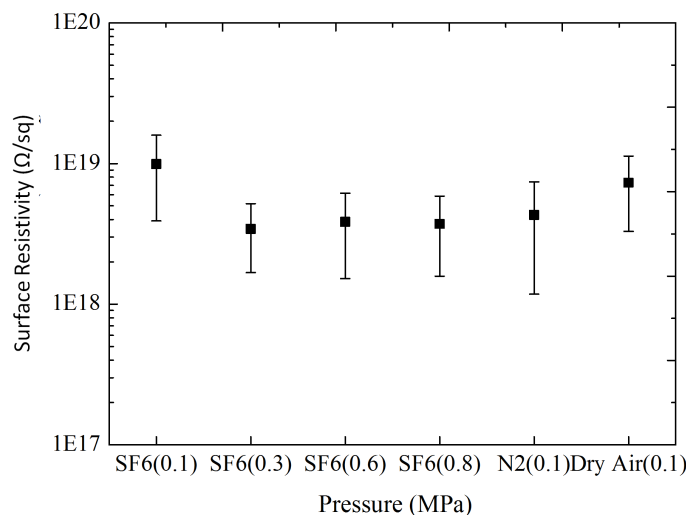
---

Für den Ladungstransport entlang von Grenzflächen wird häufig der vereinfachende Begriff der *spezifischen Oberflächenleitfähigkeit* bzw. des dazu reziproken *spezifischen Oberflächenwiderstandes* verwendet, der teilweise wie eine Materialeigenschaft behandelt wird. Allerdings wird in DIN EN 62631-3-2 bereits darauf hingewiesen, dass der Oberflächenwiderstand vielmehr von den Umgebungsbedingungen und von Verarbeitung und Zustand der Oberfläche abhängt und damit keine Materialeigenschaft ist [DIN62631-3-2]. Derzeit gibt es Hinweise darauf, dass die elektrische Leitung entlang von sauberen Isolierstoffoberflächen zwar vom Material abhängig ist, aber das umgebende Gas und seine Eigenschaften eine große Rolle spielen [Zav2013], [Zav2014].

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, weisen feste Isolierstoffe Haftstellen für Ladungsträger auf, die eine Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit gegenüber einem ungestörten Material bewirken können. Es wird davon ausgegangen, dass nahe der Oberfläche eine höhere Dichte solcher Haftstellen vorliegt,

die zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit führt [Lut2011]. Diese Eigenschaft kann sicher teilweise dem Material zugeschrieben werden, hängt allerdings auch von der Bearbeitung der Oberfläche ab. So kann der gemessene Widerstand der Oberfläche variieren in Abhängigkeit davon, ob die Oberfläche durch die Entnahme aus einer Gussform entstanden ist oder mit Schleifmitteln nachbearbeitet wurde [Lut2011].

Der spezifische Oberflächenwiderstand von mit Aluminiumoxid gefülltem Epoxidharzformstoff, einem typischen Isolierstoff für gasisolierte Systeme, wurde von Zavattoni et al. bei verschiedenen Gasdrücken und Gasfeuchten untersucht [Zav2013]. Hierbei zeigte sich, dass bei der Nutzung *trockener* Gase nur eine geringe Abhängigkeit der gemessenen spezifischen Oberflächenleitfähigkeit von Art und Druck des Gases besteht, wie in Abbildung 2.6 zu sehen ist<sup>7</sup>. Dabei konnte auch nachgewiesen werden, dass die gemessenen Ströme entlang der Oberfläche bei einer Messung des Oberflächenwiderstandes mittels der Kreisingelektrodenanordnung nach DIN EN 62631-3-2 nicht allein durch den Strom durch das Isolierstoffvolumen erklärt werden können. Dies ist ein Hinweis dafür, dass Oberflächen häufig eine höhere Leitfähigkeit aufweisen als das dazugehörige Isolierstoffvolumen [Zav2013].



**Abbildung 2.6.:** Gemessene spezifische Oberflächenwiderstände<sup>7</sup> von mit Aluminiumoxid gefülltem Epoxidharz in verschiedenen Gasen [Zav2014]

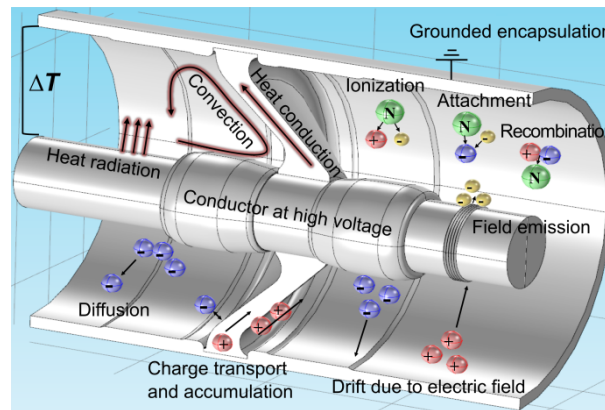
Dabei konnte eine Abhängigkeit der spezifischen Oberflächenleitfähigkeit von der Gasfeuchte, Temperatur (von Gas und Prüfling) und der Feldstärke festgestellt werden, was auch von anderen Quellen bestätigt wird [Lut2009], [Lut2011]. Der Einfluss der Gasfeuchte zeigte sich erst für Werte der relativen Feuchte von  $\approx 30\%$  (bei  $40^\circ\text{C}$  und  $60^\circ\text{C}$ ) [Zav2013], [Zav2014]. Ebenfalls wurde eine zeitliche Abhängigkeit des Stroms bei den Messungen in trockenem Gas beobachtet, die qualitativ mit der bei Messungen der Volumenleitfähigkeit ermittelten vergleichbar ist [Zav2014], [Lut2011].

### 2.1.5 Auswirkung der Leitungsmechanismen auf die Feldverteilung

Die in den Abschnitten 2.1.2 bis 2.1.4 beschriebenen Mechanismen bewirken eine Veränderung der Feldverteilung gegenüber der in Abschnitt 2.1.1 vereinfacht dargestellten Situation und sind in Ab-

<sup>7</sup> Bei der spezifischen Größe kürzen sich die geometrischen Einheiten heraus, weshalb als Einheit nur  $\Omega$  übrig bleibt. Um eine Differenzierbarkeit zu erhalten, wird die Einheit oft *Quadratwiderstand*, *Ohm-squared*, oder  $\Omega_{\text{sq}}$  geschrieben.

bildung 2.7 wiedergegeben. Wenn die spezifische Leitfähigkeit des Isoliergases in der Größenordnung der spezifischen Leitfähigkeit des festen Isolierstoffes liegt, müssen die Prozesse des Ladungstransports im Isoliergas berücksichtigt werden, um die Feldverteilung und die Ansammlung von Flächenladungen berechnen zu können. Bei Berechnungen unter Annahme einer konstanten spezifischen Gasleitfähigkeit kann speziell die Oberflächenladungsdichte ungenau eingeschätzt werden, bis hin zu einer falschen Annahme bezüglich der Polarität.



**Abbildung 2.7.:** Überblick der Ladungstransportmechanismen im Inneren eines gasisolierten Systems [Her2017]

Abhängig davon, ob die spezifische Leitfähigkeit des Gases deutlich höher als die des Feststoffisolators ausfällt, in derselben Größenordnung liegt oder deutlich geringer ist, und wie die spezifische Oberflächenleitfähigkeit ausfällt, ergeben sich teilweise stark voneinander abweichende Feldverteilungen. Dabei kann es passieren, dass das feldbestimmende Medium des Isoliersystems wechselt, wenn beispielsweise die Außentemperaturen sinken und dadurch die spezifische Leitfähigkeit des festen Isolierstoffes abnimmt.

Nicht angesprochen wurden bisher Teilentladungen, also lokal begrenzte selbstständige Entladungen, die bei Gleichspannung pulsfrei und stabil ausfallen können und eine Quelle für Ladungsträger darstellen. Da der Teilentladungseinsatz vermieden werden soll, wird der Einfluss von Teilentladungen während des Designprozesses noch nicht beachtet. Nichtsdestoweniger sollte ein Isoliersystem eine gewisse Robustheit gegen Teilentladungen, etwa verursacht durch bewegliche Partikel, aufweisen (vgl. [Her2014]).

Während die Ansammlung der Oberflächenladungen bei dominantem Ladungstransport durch den Isolator oder das Isoliergas von der Verteilung der Normalfeldstärke des kapazitiven Feldes entlang der Oberfläche abhängt, wird sie bei dominierendem Ladungstransport entlang der Oberfläche durch deren Tangentialfeldstärke bestimmt. Die spezifische Leitfähigkeit der Oberfläche ist ebenfalls von den Umgebungsbedingungen abhängig und kann weiterhin durch Schwankungen im Fertigungsprozess und den Einbau beeinträchtigt werden. So können sich lokal signifikante Unterschiede durch die Verteilung von Trennmittel in der Gussform, Kratzer durch Transport und Einbau, Verschmutzungen oder Fettablagerungen ergeben.

Der Einfluss der Leitungsmechanismen in festen Isolierstoffen auf die Feldverteilung wurde bisher hauptsächlich im Kontext von Kabelsystemen untersucht [Maz2013], [Mor1997]. In der dazugehörigen Literatur wird meist eine Ansammlung von *Homocharges* festgestellt, die in ihrer Wirkung auf die Feldverteilung als eine virtuelle vorgelagerte Elektrode im Isolierstoff verstanden werden kann. Dies be-

---

deutet, dass der Isolierstoff direkt vor der Elektrode im stationären Betrieb entlastet wird, das übrige Isolierstoffvolumen jedoch etwas stärker belastet wird.

Erste Ergebnisse an Epoxidharzverbundstoffen, wie sie in gasisolierten Systemen zum Einsatz kommen, zeigen, dass sich in diesen ebenfalls *Homocharges* vor der negativen Elektrode ausbilden, die den Effekt einer vorgelagerten Elektrode haben [Wen2018]. Makroskopisch mag der Effekt nur eine geringe Rolle spielen, allerdings ist nicht auszuschließen, dass sich bei längeren Belastungszeiten eine größere Eindringtiefe der virtuellen Elektrode ergibt.

Entgegen der Feldverteilung der vereinfachten Betrachtung (vgl. Abschnitt 2.1.1) lassen sich die Feldverteilungen unter Einbezug der komplexen Ladungstransportmechanismen mittels kommerzieller Software derzeit nicht, wie im Fall des *Raumladungsbegrenzten Ladungstransports* in Feststoffen, oder nur durch eigene Erweiterungen berechnen, wie dies beim Ladungstransport in Gasen realisiert wurde [Win2015].

Die Prozesse beeinflussen nicht nur die stationäre Feldverteilung, sondern den dynamischen Vorgang und damit die bis zum Einstellen eines stationären Strömungsfeldes nötige Zeit. Zudem sind viele dieser Prozesse von einer Vielzahl von Umgebungsparametern abhängig. Dies bedeutet, dass die resultierende Feldverteilung durch beispielsweise die Temperaturverteilung und Gasfeuchte im Isoliersystem, vom Alterungszustand des Materials, der Hintergrundstrahlung und der anliegenden Spannung beeinflusst werden kann. Hierdurch wird die Auslegung eines ungesteuerten Systems für alle relevanten Fälle erschwert.

---

## 2.2 Grundlagen der Feldsteuermaterialien

---

Um eine unkontrollierte und potentiell unvorteilhafte Feldverteilung zu vermeiden, können verschiedene Methoden der Feldsteuerung eingesetzt werden. Während bei der *geometrischen Feldsteuerung* Feldüberhöhungen durch eine geeignete Ausformung von Elektroden vermieden werden, kommen bei der *kapazitiven Feldsteuerung* leitfähige Beläge im Isolierkörper zum Einsatz, um die Potentialverteilung zu definieren [Küc2017]. Beide Techniken sind für den Einsatz in Gleichspannungssystemen jedoch nur bedingt geeignet. Die geometrische Steuerung an Grenzflächen in Gleichspannungssystemen kann den häufig stark voneinander abweichenden spezifischen Leitfähigkeiten der eingesetzten Materialien kaum entgegenwirken. Zudem weist diese Methode der Feldsteuerung prinzipbedingt einen großen Platzbedarf auf. Die kapazitive Feldsteuerung dürfte, dem Namen nach, keine Wirksamkeit in Gleichspannungssystemen zeigen, was allerdings nicht ganz zutreffend ist. Hier kann die spezifische Leitfähigkeit der Materialien anstelle der Permittivität genutzt werden, um prinzipiell denselben Effekt zu erzielen. Nachteilig bei dieser Form der Feldsteuerung sind der hohe Fertigungsaufwand und die eingeschränkte Nutzbarkeit bei komplexen Geometrien.

Alternativ können die *refraktive Feldsteuerung*, die *resistive Feldsteuerung* und die *nichtlineare Feldsteuerung* zum Einsatz kommen, bei denen die gewünschte Feldverteilung durch *Feldsteuermaterialien* (im Englischen *Field Grading Materials*, kurz *FGMs*) erzielt wird [Küc2017]. Dabei handelt es sich um Materialien mit definierten elektrischen Eigenschaften, die eine effektive Manipulation der Feldverteilung zulassen. Im Fall von kapazitiven Steuerbelägen bedeutet dies, dass die Permittivität höher eingestellt wird als die von üblich eingesetzten Isolierstoffen. Für resistive Feldsteuermaterialien nutzt man entsprechend Materialien mit einer höheren spezifischen Leitfähigkeit. Nichtlineare resistive Feldsteu-

---

ermaterialien sind eine Sonderform der resistiven Feldsteuerung und werden in den Abschnitten 2.2.2 und 2.3 genauer behandelt. Oftmals geht eine Steigerung der Permittivität auch mit einer Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit einher und umgekehrt.

---

### 2.2.1 Allgemeiner Aufbau von Feldsteuermaterialien

---

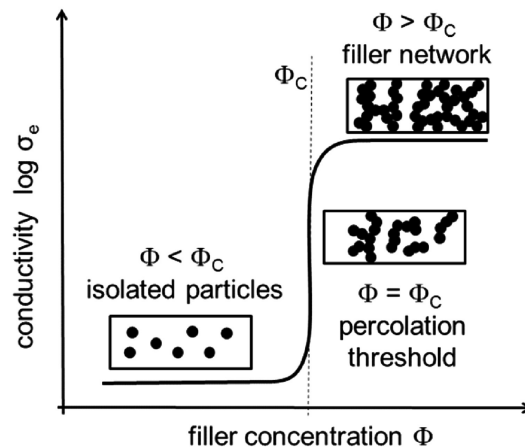
Meist handelt es sich bei Feldsteuermaterialien um Verbundstoffe auf der Basis einer Polymermatrix. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass sich die unterschiedlichen Polymere gut eignen, um in die zu steuernden Isoliersysteme (z.B. Kabelmuffen und -endverschlüsse, Durchführungen, sowie gasisolierte Schaltanlagen und Leitungen) integriert zu werden. Theoretisch könnten auch direkt Polymere mit veränderten elektrischen Eigenschaften eingesetzt werden, wie zum Beispiel Kunststoffe mit erhöhter Elektronenleitfähigkeit [Pel2004], [Kie2000], [Son2013]. Die Forschung in diesem Bereich hat sich allerdings stärker auf die Herstellung von möglichst leitfähigen Kunststoffen konzentriert, wodurch nur wenige für die Feldsteuertechnik nutzbare Produkte entstanden sind (vgl. [Lee2006]). Ein ganz anderes Beispiel sind Gläser, die ebenfalls mit variierenden elektrischen Eigenschaften hergestellt werden können [dgg2015]. Auch wenn in Bezug auf die Sprödigkeit Fortschritte erzielt wurden, eignen sich Gläser nicht für alle Anwendungen.

Die meisten Feldsteuermaterialien sind daher Verbundstoffe (engl.: *compounds*), die durch das Einmischen pulverförmiger Füllstoffe in die Polymermatrix entstehen. Als Polymere kommen beispielsweise Silikonkautschuk und Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (kurz EPDM) für Anwendungen, die mechanisch flexible Materialien erfordern, Epoxidharz für stützende Strukturen oder Polyurethan für Lacke und Beschichtungen infrage.

Als Füllstoffe kommen je nach gewünschter spezifischer Leitfähigkeit oder Permittivität Ruß, Siliziumcarbid, Titandioxid, Strontiumtitanat, Carbon Nanotubes, Graphene, Mikrovaristoren und Partikel der Iriotec®-Serie der Firma Merck zum Einsatz.

Bei den beiden erstgenannten handelt es sich um *klassische* Füllstoffe, die in einem bestimmten Volumenverhältnis in die Polymermatrix eingebracht werden müssen, um die gewünschten Materialeigenschaften zu erzielen. Während die einzelnen Partikel vergleichsweise leitfähig sind, bewirkt eine geringe Volumenkonzentration kaum eine Veränderung der elektrischen Eigenschaft des fertigen Compounds, dieses weist weiterhin eine geringe spezifische Leitfähigkeit auf. Werden mehr Partikel eingefüllt, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich Partikel berühren und leitfähige, zusammenhängende Ketten und Bäume im Verbundstoff bilden. Verbinden diese sich wiederum zu Strukturen, deren Länge ausreicht, um das gesamte Compound zu durchziehen, steigt die spezifische Leitfähigkeit sprunghaft an. Dieser Punkt wird als *Perkolationsschwelle* bezeichnet. Bildhaft dargestellt ist der Zusammenhang in der *Perkulationskurve*, welche die spezifische Leitfähigkeit (oder generell die Eigenschaft von Interesse) in Abhängigkeit von der Füllstoffkonzentration zeigt (vgl. Abbildung 2.8).

Da besonders Ruß sehr leitfähig ist, kann er nicht im Bereich oberhalb der Perkolationsschwelle (*überperkolutiv*) eingesetzt werden, um Feldsteuermaterialien zu erzeugen (hingegen wird dies genutzt, um beispielsweise Deflektoren für die geometrische Feldsteuerung zu fertigen). Im Gegensatz dazu werden die im Abschnitt 2.2.2 genauer beschriebenen funktionellen Füllstoffe oberhalb der Perkolationsschwelle eingesetzt. Dies ist möglich, da jedes einzelne Partikel eine geringe Leitfähigkeit aufweist und auch ein perkolierender Verbund nicht zu leitfähig wird, um als Feldsteuermaterial nutzbar zu sein. Hier-



**Abbildung 2.8.:** Exemplarische Perkolkationskurve für Rußpartikel in einer isolierenden Matrix [Mün2016]

durch ergibt sich der Vorteil, dass die elektrischen Eigenschaften des Verbundstoffes nicht so empfindlich auf eine Schwankung des Füllstoffanteils (der z.B. durch die Herstellung bedingt auftreten könnte) reagieren wie bei Füllstoffen, die im Bereich der Perkolationsschwelle eingefüllt werden. Als Nachteil ist jedoch zu nennen, dass die Verarbeitbarkeit der Verbundstoffe durch den hohen Volumenanteil, den die Füllstoffe einnehmen, oft verschlechtert wird.

Siliziumcarbid ist weniger leitfähig als Ruß und wird als Füllstoff im Bereich der Endenglimmschutzsysteme rotierender Maschinen eingesetzt. Die elektrische Leitfähigkeit dieses Halbleitermaterials wäre für diese Anwendung eigentlich zu hoch. Durch die Nutzung vieler kleiner Partikel wird jedoch der Kontaktübergangswiderstand zusätzlich wirksam und es ergeben sich für die Feldsteuerung nutzbare Leitfähigkeiten. Diese lassen sich allerdings nur in einem begrenzten Bereich einstellen [Don2011]. Ein weiterer Nachteil ist die Verarbeitbarkeit des Rohstoffs, da durch seine Härte z.B. Spritzgussanlagen stärker abgenutzt werden.

Eine Sonderstellung zwischen den klassischen Füllstoffen und den funktionellen Füllstoffen könnten Metall-Isolator-Varistoren einnehmen. Dabei handelt es sich um Metallpartikel die mit einer isolierenden Schicht von etwa 10 nm bis 20 nm Dicke umgeben sind [Wei2008]. Bei einer entsprechenden Feldstärke können die isolierenden Schichten zweier benachbarter Partikel von Elektronen durchtunnelt werden, wodurch sich eine nichtlineare Leitfähigkeit ergibt. Ein einzelnes Partikel hat dabei eine vernachlässigbar geringe Leitfähigkeit. Metall-Isolator-Varistoren werden für den Aufbau von Schutzelementen für elektronische Bauteile untersucht [Wei2008]. Bei richtiger Skalierung ist ein Einsatz als Feldsteuermaterial zumindest denkbar.

Ein aktueller Entwicklungstrend sind zudem Nanofüllstoffe, welche eine besonders niedrige Perkolationsschwelle zeigen. Dieser Effekt wird in der Literatur stellenweise durch die Bildung einer *Interzone* oder *Interphase* begründet [Sei2014], [Tan2005], [Wes1991]. Damit wird ein Bereich um die Füllstoffpartikel herum bezeichnet, der veränderte elektrische Eigenschaften aufweist. Teilweise ist diese Eigenschaftsänderung wünschenswert und kann gezielt nutzbar gemacht werden [Lew2004], [Hus2018b], [Hus2018a]. Zwar liegen Nanofüllstoffe nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit, allerdings lassen sich die hier gewonnen Erkenntnisse und Methoden möglicherweise auf diese übertragen, wenn elektrisch nichtlineare Nanofüllstoffe entwickelt werden.



---

## 2.2.2 Funktionelle Füllstoffe für Feldsteuermaterialien

---

Als funktionelle Füllstoffe werden im Kontext dieser Arbeit Füllstoffe bezeichnet, deren elektrische Eigenschaften eine intrinsische Eigenschaft der einzelnen Partikel darstellen. Im Gegensatz dazu ist die spezifische Leitfähigkeit z.B. von einem mit Siliziumcarbid gefüllten Polymer zu einem großen Teil auf den Kontaktübergangswiderstand zwischen den einzelnen Füllstoffpartikeln zurückzuführen. Da bei funktionellen Füllstoffen die interessierenden elektrischen Eigenschaften weitestgehend durch die Füllstoffpartikel selbst definiert werden, lassen sich mit diesen Feldsteuermaterialien herstellen, deren Eigenschaften weniger von der Interaktion mit der Isolierstoffmatrix abhängen und die allgemein eine geringere Anfälligkeit gegenüber äußeren Einflüssen und Alterungseffekten aufweisen [Don2011].

Prinzipiell können funktionelle Füllstoffe zur Veränderung verschiedenster Eigenschaften eingesetzt werden, etwa der mechanischen Festigkeit, der Wärmeleitfähigkeit oder der Permittivität. Im Kontext der Untersuchung von Feldsteuermaterialien für Gleichspannungsanwendungen erfährt allerdings die spezifische Leitfähigkeit im Folgenden besondere Aufmerksamkeit. Da die elektrische Feldstärke in gas-isolierten Systemen für Spannungen über 320 kV sehr hoch ausfallen kann, darf die spezifische Leitfähigkeit der Feldsteuermaterialien und damit der Füllstoffe nicht zu hoch sein, um eine unzulässige Verlustleistung und damit Eigenerwärmung zu vermeiden (vgl. Abschnitt 4.2). Weiterhin kann eine nicht-lineare elektrische Leitfähigkeit vorteilhaft sein, also eine spezifische Leitfähigkeit, die eine Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke aufweist. Beispiele für interessante Materialien sind *Mikrovaristoren* und *substratbasierte funktionelle Füllstoffe*, die im Folgenden vorgestellt werden.

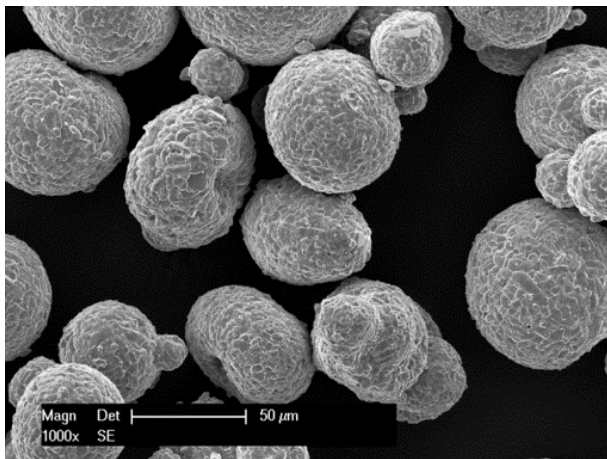
### Mikrovaristoren

Ein Beispiel für stark nichtlineare Füllstoffe zur Erzeugung von Feldsteuermaterialien stellen Mikrovaristoren dar. Ableiterhersteller erkannten das Potential zur Feldsteuerung durch nichtlineare Materialien und entwickelten eine verkleinerte Variante der bekannten Metalloxidvaristoren in Pulverform [Boe2001], [Rhy1997]. Diese sogenannten Mikrovaristoren sind meist sphärische Partikel, wobei auch Toroide auftreten können, mit einem Durchmesser im Bereich von 10 µm bis 100 µm. Sie bestehen aus einer Keramik aus gesintertem Zinkoxid (ZnO) und weiteren Additiven. Durch das Herstellungsverfahren bildet das Zinkoxid mehrere Körner innerhalb der Partikel aus. Die elektrischen Eigenschaften werden maßgeblich durch die Korngrenzen zwischen diesen ZnO-Körnern bestimmt [Don2011]. Eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme mehrerer unverarbeiteter Mikrovaristoren ist in Abbildung 2.9 (a) dargestellt.

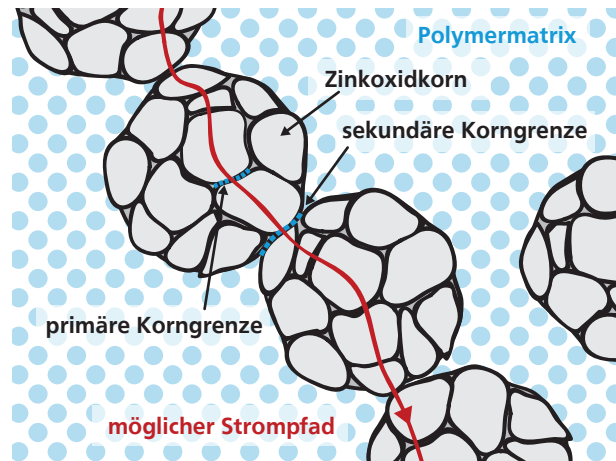
Der Aufbau eines Feldsteuermaterials auf Basis von Mikrovaristoren ist schematisch in Abbildung 2.9 (b) dargestellt. Die sich berührenden Partikel bilden einen möglichen Strompfad (rot markiert) innerhalb der Isolierstoffmatrix. Die Punkte, an denen sich die Partikel berühren, werden auch *sekundäre Korngrenzen* genannt, im Gegensatz zu den *primären Korngrenzen*, welche die ZnO-Körner innerhalb der Partikel trennen [Don2011]. Der Strompfad führt durch die einzelnen Körner, die n-dotiert sind und damit eine vergleichsweise hohe Leitfähigkeit aufweisen<sup>8</sup>. Die primären Korngrenzen stellen eine Potentialbarriere im Leitungsband dar, vergleichbar mit einer doppelten Schottky-Barriere. Elektro-

---

<sup>8</sup> Die spezifische Leitfähigkeit von n-dotiertem Zinkoxid kann bis zu  $10^6$  S/m betragen [Mor2009], allerdings darf die Dotierung nicht zu hoch gewählt werden, da dies die Ausbildung einer ausgeprägten Korngrenzbarriere verhindern würde [Cla1999].



(a)



(b)

**Abbildung 2.9.:** (a) Rasterelektronenmikroskopaufnahme unverarbeiteter Mikrovaristoren [Ten2015]  
(b) Funktionsschema perkulierender Mikrovaristoren in einer Polymermatrix, nach [Don2011]

nen müssen diese überwinden, was zu einer geringen Leitfähigkeit bei niedrigen Feldstärken führt. Eine Erhöhung der Feldstärke führt zu einem reversiblen Zusammenbruch der Potentialbarriere durch einen *Lawineneffekt* und damit zu einem Anstieg der Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen. Die Feldstärke, ab der dieser Effekt eintritt, wird als *Schaltfeldstärke*<sup>9</sup> bezeichnet. Diese Effekte sind analog zu denen in Metalloxidvaristoren und werden in der entsprechenden Literatur behandelt [Eda1989], [Gre1990], [Cla1999], [Sch1994].

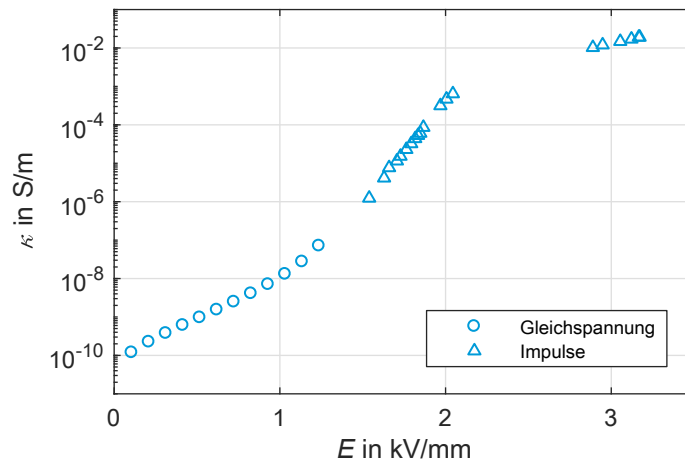
Die Korngrenzeffekte sind die Ursache für die stark nichtlineare elektrische Leitfähigkeit von Mikrovaristoren. Abbildung 2.10 zeigt eine exemplarische  $\kappa$ -*E*-Kennlinie für ein aus Mikrovaristoren hergestelltes Feldsteuermaterial. Wie gut zu erkennen ist, nimmt die spezifische Leitfähigkeit mit steigender Feldstärke zu. Die besonders ausgeprägte Feldstärkeabhängigkeit von Mikrovaristoren wird darin deutlich, dass die spezifische Leitfähigkeit im betrachteten Feldstärkebereich um acht Größenordnungen zunimmt. Bei hohen Feldstärken weisen Mikrovaristoren (genauso wie Metalloxidvaristoren für Ableiter) jedoch eine Sättigung der Leitfähigkeit auf. Diese resultiert daraus, dass die Potentialbarrieren bei hohen Feldstärken weitestgehend zusammengebrochen sind und nun die Leitfähigkeit des Zinkoxids die Gesamtleitfähigkeit begrenzt.

Wie in Kapitel 4 gezeigt wird, kann es wünschenswert sein, einzelne Parameter der  $\kappa$ -*E*-Kennlinie anzupassen, um eine effektive Feldsteuerung zu ermöglichen. Hierzu können die elektrischen Eigenschaften der Mikrovaristoren durch die Zugabe der Additive und durch Variationen im Herstellungsprozess in gewissen Grenzen eingestellt werden. Zum Beispiel hängt die Schaltfeldstärke direkt von der Größe der ZnO-Körner ab, da bei kleineren Körnern mehr Potentialbarrieren<sup>10</sup> je Wegelement überwunden werden müssen. Das Wachstum der Körner wird sowohl durch die Beigabe von Additiven als auch durch die Temperaturen während des Sprühsinterprozesses bestimmt [Don2012].

<sup>9</sup> Der Begriff der Schaltfeldstärke wird in der Literatur unterschiedlich genutzt und in Abschnitt 2.3.2 detaillierter behandelt.

<sup>10</sup> Eine einzelne Potentialbarriere weist eine Schaltspannung von etwa 3,2 V bis 3,4 V auf [Don2011], [Gre1990].





**Abbildung 2.10.:**  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie eines mikrovaristorgefüllten Epoxidharzformstoffs

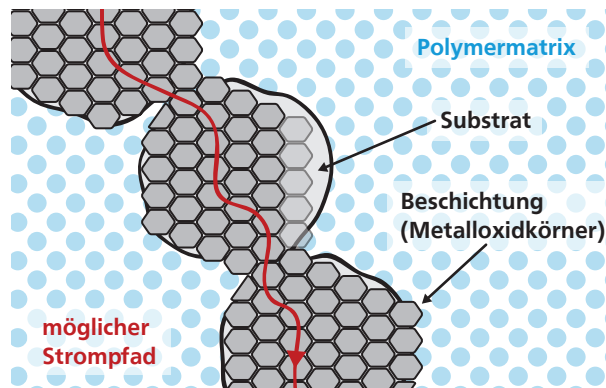
Die auf diese Weise erzielbare Bandbreite der elektrischen Eigenschaften von Mikrovaristoren hat dazu geführt, dass diese in den letzten zwanzig Jahren in verschiedensten Betriebsmitteln der Energietechnik eingesetzt wurden. Die Hauptanwendung stellen Mittelspannungs-Kabelgarnituren dar, bei denen Mikrovaristoren mit Schaltfeldstärken im Bereich von 1 kV/mm eingesetzt werden [Str2001], [Don2011]. Im Vergleich dazu werden Mikrovaristoren in Kabelgarnituren für hohe Spannungen noch selten eingesetzt [Jer2018]. Einen weiteren Einsatz in kommerziell vertriebenen Produkten finden Mikrovaristoren in Durchführungen [Ye2014]. Pilot- und Forschungsprojekte beschäftigen sich zudem mit dem Einsatz von Mikrovaristoren in Endenglimmschutzsystemen [Wei2010], [Deb2011], [Don2016] und zur Unterdrückung von Fremdschicht- und Trockenbandüberschlägen entlang von Verbundisolatoren [Deb2011b], [Ye2015], [Sch2017].

### Substratbasierte funktionelle Füllstoffe

Eine weitere Möglichkeit, funktionelle Füllstoffe herzustellen, ist die Nutzung eines Substrats oder Trägermaterials, welches mit einer Kombination aus mehreren dotierten Metalloxiden beschichtet wird. Diese Beschichtung ist mit dem Aufbau der bereits beschriebenen Mikrovaristoren vergleichbar, d.h. es bilden sich ebenfalls Körner aus, deren Korngrenzen Potentialbarrieren darstellen und die elektrische Leitfähigkeit bestimmen [Gre2015].

Der Aufbau solcher Partikel ist schematisch in Abbildung 2.11 dargestellt. Durch die Nutzung des Substrats lässt sich in erster Linie die Form der resultierenden Partikel steuern. Das Substrat selbst ist dabei meist isolierend und wird nicht für die Einstellung der elektrischen Eigenschaften genutzt.

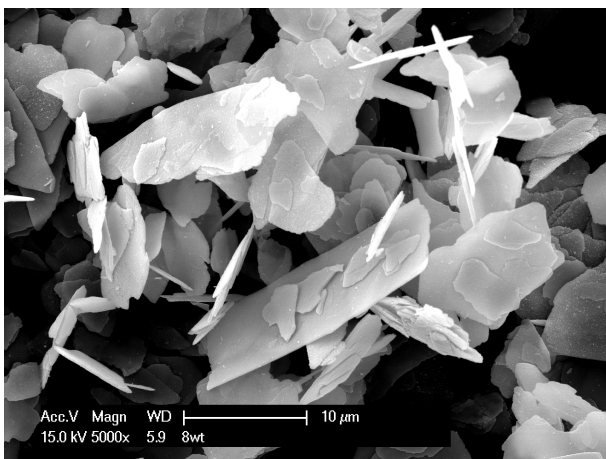
Diese Partikel wurden ursprünglich entwickelt, um günstige halbleitfähige Beschichtungen herzustellen, die als Grundierung für elektrostatische Lackierprozesse dienen. Weiterhin werden die Partikel eingesetzt, um Kunststoffböden mit ausreichender spezifischer Leitfähigkeit zu versehen, um elektrostatische Aufladungen zu vermeiden [Rüg2012]. Hierzu sind planare Partikel nützlich, die ein hohes Aspektverhältnis aufweisen. In Lacken und dünnen Schichten richten sich solche Füllstoffpartikel überwiegend parallel an den Oberflächen aus und können damit besonders effizient eingesetzt werden. Mit Glimmer wurde ein elektrisch isolierendes Substrat gefunden, welches ein hohes Aspektverhältnis aufweist und zudem günstig in großen Mengen verfügbar ist. Beispielsweise sind die heute unter dem Produktnamen



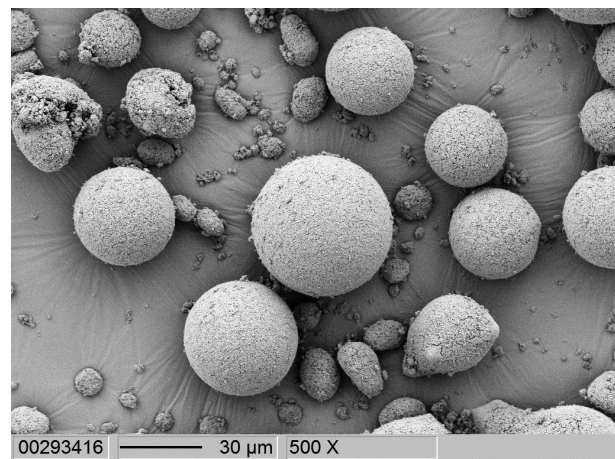
**Abbildung 2.11.:** Funktionsschema perkolierender substratbasierter Füllstoffpartikel in einer Polymermatrix, nach [Don2011]

Iriotec<sup>®</sup> verkauften Füllstoffe der Firma Merck funktionelle Füllstoffe, die aus mit antimondotiertem Zinnoxid beschichtetem Glimmer bestehen. Eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme von unverarbeitetem Iriotec<sup>®</sup> ist in Abbildung 2.12 (a) gezeigt.

Neben Glimmer lassen sich auch andere Materialien als Substrat nutzen, wodurch die Form gewählt werden kann, wie in Abbildung 2.12 (b)<sup>11</sup> zu sehen ist. Hierdurch lässt sich der Füllstoff an verschiedene Anforderungen anpassen. Beispielsweise lassen sich sphärische Partikel gut in größeren Isolierstoffvolumen verarbeiten, wohingegen planare Partikel eine bessere Eignung für Lacke und Beschichtungen aufweisen.



(a)



(b)

**Abbildung 2.12.:** Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von (a) Iriotec<sup>®</sup> mit hohem Aspektverhältnis [Ten2015] und (b) einem Materialprototypen in sphärischer Form<sup>11</sup>

Weiterhin kann das Substrat eingesetzt werden, um die mechanischen Eigenschaften zu verändern oder die Wärmeleitfähigkeit zu verbessern. Hierzu kommt beispielsweise Aluminiumoxid zum Einsatz, welches bereits ein beliebter Füllstoff für den Einsatz in gasisolierten Schaltanlagen ist. An dieser Stelle

<sup>11</sup> Die REM-Aufnahme wurde freundlicherweise von Herrn Dr. Johann Bauer und dem Merck-REM-Team erstellt und zur Verfügung gestellt.

---

sollte allerdings erwähnt werden, dass die thermische Leitfähigkeit von reinen Metalloxiden herausragend ist und von substratbasierten Füllstoffen typischerweise nicht erreicht wird<sup>12</sup>.

Nach der Wahl des Substrats wird dieses gereinigt und beschichtet. Hierzu können unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen, etwa ein Fällprozess oder die Beschichtung im Wirbelschichtreaktor. Möglich ist auch das Hintereinanderschalten verschiedener Beschichtungsprozesse. Hierdurch ergibt sich eine große Auswahl an nutzbaren Materialien für die Beschichtung, und es können neben Metalloxiden auch organische Materialien zum Einsatz kommen. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Partikel wurden hauptsächlich mit dotierten Metalloxiden beschichtet. Unter anderem kamen antimon-dotiertes Zinnoxid und Titandioxid mit unterschiedlichen Dotierstoffen zum Einsatz. Nach dem Beschichten werden die Partikel gesintert, um wie bei Mikrovaristoren das Kornwachstum zu steuern.

Durch den hohen Freiheitsgrad bei der Wahl der beteiligten Elemente lassen sich sehr unterschiedliche elektrische Eigenschaften erzielen. So ist es möglich, neben stark nichtlinearen Materialien auch die Kombination aus geringer spezifischer Leitfähigkeit ( $\kappa < 10^{-10}$  S/m) und moderater Nichtlinearität bis hin zu fast linear leitfähigen Materialien zu erzeugen. Solche Materialien können in Anwendungen außerhalb der Energietechnik, wie industriellen, medizinischen oder wissenschaftlichen Geräten, von Nutzen sein.

In der Hochspannungstechnik werden Endenglimmschutzsysteme im Prototypenstadium auf Basis der Materialien der Iriotec®-Serie erprobt (vgl. [Lan2013], [Sta2013]). Zudem werden die Partikel als Teil des Feldsteuermaterials für Kabelmuffen vorgeschlagen [Jon2015].

---

## 2.3 Anwendung nichtlinearer Feldsteuermaterialien

---

Das Ziel von Feldsteuermaßnahmen ist die Vergleichmäßigung von Feldstärken im Volumen oder entlang von Isolierstrecken. Im Rahmen dieser Arbeit wird speziell die Feldverteilung an Isolierstrecken entlang von Grenzflächen betrachtet, die eine typische Schwachstelle in vielen Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik, aber auch speziell von gasisolierten Systemen darstellen, wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben.

Feldsteuermaterialien, wie die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten, können eingesetzt werden, um die Feldverteilung entlang solcher Schwachstellen zu optimieren. Dabei kann nach unterschiedlichen Philosophien zur Feldsteuerung vorgegangen werden, von denen zwei in diesem Abschnitt genauer beschrieben werden sollen. Dabei handelt es sich um die *Feldsteuerung über den gesamten Betriebsbereich* und die *Feldsteuerung durch die Reduktion von akkumulierten Ladungsträgern*. Da der Fokus dieser Arbeit auf Gleichspannungsisoliersystemen liegt, werden nur die für diesen Fall relevanten Methodiken aufgezeigt.

---

### 2.3.1 Allgemeiner Einsatz von Feldsteuermaterialien in Gleichspannungssystemen

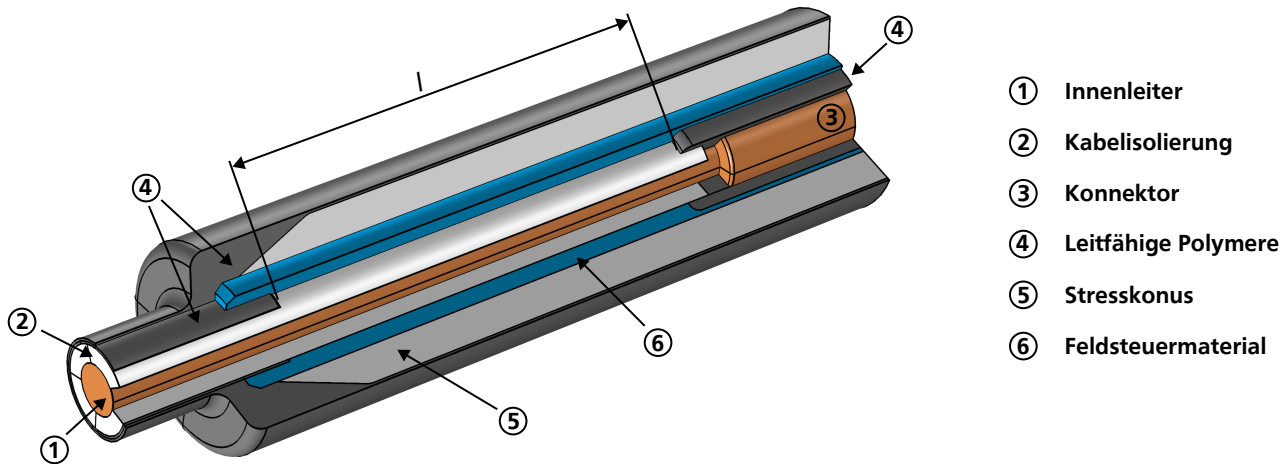
---

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie Feldsteuermaterialien eingesetzt werden können, um eine vorteilhafte Feldverteilung in anspruchsvollen Gleichspannungsisoliersystemen zu erzielen. Als Beispiele für die

---

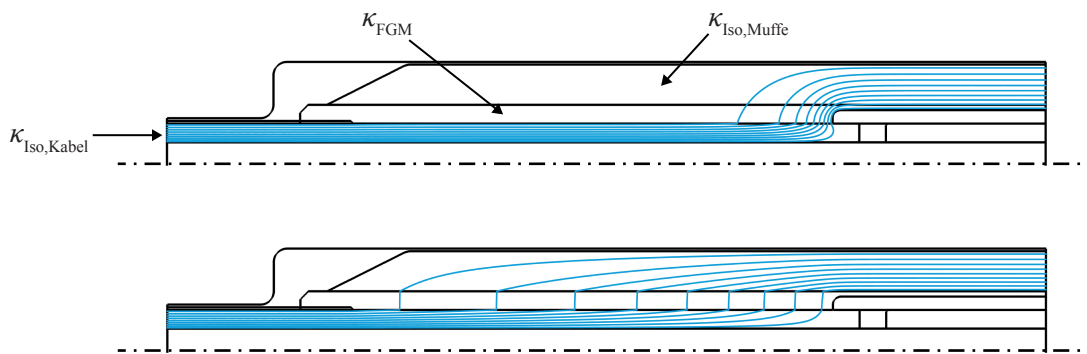
<sup>12</sup> In Messungen an Epoxidharzverbundstoffen konnten für die mikrovaristorbasierten Prüflinge Wärmeleitfähigkeiten von 1,3 W/(m·K) festgestellt werden, während Verbundstoffe auf Basis substratbasierter Füllstoffe nur Werte um 0,5 W/(m·K) erreichten.

Erklärungen wird auf die Beispiele einer gesteuerten Kabelmuffe und eines gesteuerten Schottisolators eines gasisolierten Systems eingegangen, die in Abbildung 2.13 respektive Abbildung 2.1 dargestellt sind. Die Länge, über welche das System gesteuert werden soll und die damit für die Auslegung die wichtigste Rolle spielt, ist im Beispiel der Kabelmuffe (Abbildung 2.13) mit  $l$  beschriftet und das Feldsteuermaterial in **blau** hervorgehoben.



**Abbildung 2.13.:** Schematische Darstellung einer Kabelmuffe mit Feldsteuerschicht

An dieser Stelle soll ein wesentlicher Unterschied zur Auslegung von AC-Feldsteuersystemen hervorgehoben werden: Das Feldsteuermaterial wird bei Gleichspannungsisoliersystemen prinzipiell *von Elektrode zu Elektrode* eingebracht, sprich es verbindet Erd- und Hochspannungspotential. Das Feldsteuermaterial sollte mindestens eine um den Faktor 100 höhere spezifische Leitfähigkeit im Vergleich zu den anderen im Isoliersystem enthaltenen Materialien aufweisen (vgl. [Chr2013]). Auf diese Weise funktioniert die Schicht oder Struktur des Feldsteuermaterials als Spannungsteiler, der für eine robuste Steuerung des Potentials entlang der Grenzfläche sorgt, wie in Abbildung 2.14 (unten) gezeigt. Im Gegensatz dazu ist in Abbildung 2.14 (oben) die Potentialverteilung einer ungesteuerten Kabelmuffe dargestellt, bei der die beteiligten Isolierstoffe voneinander abweichende spezifische Leitfähigkeiten aufweisen.



**Abbildung 2.14.:** Äquipotentialliniendarstellung der Feldverteilung in einer Kabelmuffe, oben: ungesteuert  $\kappa_{FGM} = \kappa_{Iso,Muffe}$  und unten: gesteuert  $\kappa_{FGM} = 100 \cdot \kappa_{Iso,Muffe}$  in beiden Fällen gilt:  $\kappa_{Iso,Kabel} \ll \kappa_{Iso,Muffe}$  und  $\kappa_{Iso,Kabel} \ll \kappa_{FGM}$

---

Die stark unterschiedlichen spezifischen Leitfähigkeiten verschiedener Isolierstoffe stellen eine besondere Herausforderung beim Design von Gleichspannungsisoliersystemen dar, da hierdurch Feldverdrängungseffekte eine deutlich größere Rolle spielen als bei Wechselspannungssystemen. Zusätzlich erschwert wird die Aufgabe des Isoliersystemdesigners dadurch, dass die spezifischen Leitfähigkeiten vieler Isolierstoffe nur in Kurzzeitmessungen<sup>13</sup> und bei wenigen verschiedenen Temperaturen festgestellt wurden, die Feuchte und Konditionierung der Materialien ist häufig unbekannt. Die spezifische Leitfähigkeit von Isolierstoffen hängt jedoch von all diesen Parametern ab.

Das Einbringen eines Feldsteuermaterials, dessen Eigenschaften über den gesamten Bereich der Betriebsbedingungen bekannt sind, in ein Isoliersystem kann eine deutliche Reduktion der Unwägbarkeiten bedeuten und damit sogar eine Vereinfachung des Designprozesses ermöglichen. Da Feldsteuermaterialien im Allgemeinen mindestens um zwei Größenordnungen leitfähiger sind als Isolierstoffe, können einige der komplexeren Leitungsmechanismen bei ihrer Messung und Modellierung vernachlässigt werden. Als Beispiel sei der Einsatz in einem Isolator eines gasisolierten Systems genannt: In diesem würde dann der Feststoffisolator das Systemverhalten dominieren, und die Notwendigkeit, ein komplexes Gasmodell für Berechnungen zu verwenden, entfällt.

Bevor die Strategien zum Einsatz nichtlinearer Feldsteuermaterialien erklärt werden, wird im nächsten Abschnitt aufgezeigt, wie sich nichtlineare Materialien mathematisch modellieren lassen. Weiterhin wird die nötige Nomenklatur eingeführt, um die Materialien beschreiben zu können.

---

### 2.3.2 Modellierung und Nomenklatur nichtlinearer Kennlinien

---

Da die Leitungsmechanismen der verschiedenen nichtlinearen Feldsteuermaterialien vergleichbar sind (vgl. Abschnitt 2.2.2), kann ein einziges Modell genügen, um die meisten der interessierenden Materialien zu beschreiben. In der Literatur wurde häufig die Ähnlichkeit nichtlinearer Feldsteuermaterialien mit Metalloxidvaristoren aus der Ableitertechnik zum Anlass genommen, die nichtlineare elektrische Leitfähigkeit durch halblogarithmische  $U$ - $I$ -Kennlinien darzustellen (vgl. Abbildung 2.15).

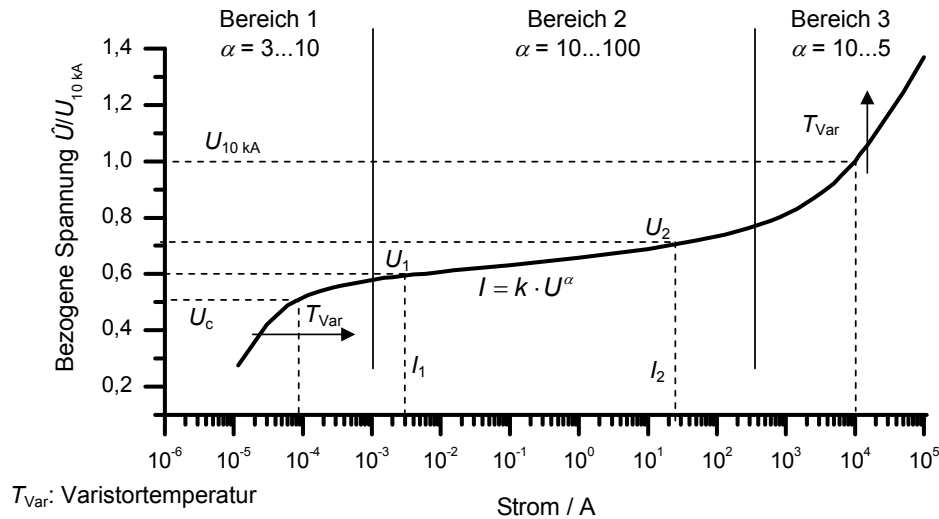
In Abbildung 2.15 sind bereits drei Bereiche markiert, welche sich aus den Mechanismen hinter dem nichtlinearen Verhalten ergeben. Bei *Bereich 1* handelt es sich um den Leckstrombereich, in dem ein Ableiter oder Material üblicherweise dauerhaft betrieben wird. *Bereich 2* ist der stark nichtlineare Bereich der Kennlinie. Zur Beschreibung dieses Bereichs wird Gleichung 2.5 eingesetzt. Dabei ist der Faktor  $k$  vom Material abhängig und der Nichtlinearitätsexponent  $\alpha$  dient als Maß für die Nichtlinearität. Die Gleichung ist jedoch nur in einem kleinen Spannungsbereich nutzbar, da der Wert von  $\alpha$  über der Spannung stark variiert. Schließlich stellt sich in *Bereich 3* eine annähernd lineare Leitfähigkeit ein, was durch das Abknicken der Kennlinie nach oben ersichtlich wird.

$$I = k \cdot U^\alpha \quad (2.5)$$

Allerdings ist die Darstellung als  $U$ - $I$ -Kennlinie oder  $E$ - $J$ -Kennlinie aus Sicht des Isoliersystemdesigns nicht sinnvoll, da für die Feldsteuerung in Gleichspannungssystemen die Verhältnisse der spezifischen

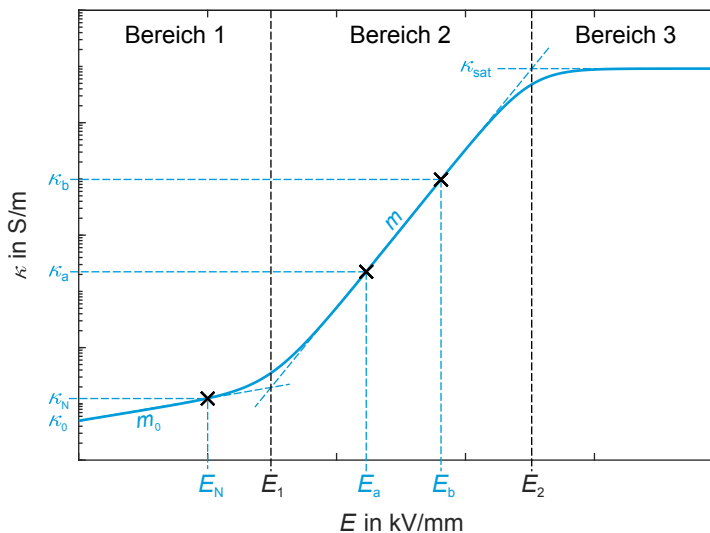
---

<sup>13</sup> Wie in Abschnitt 2.1.2 zusammengefasst wurde, kann das Messen der spezifischen Gleichstromleitfähigkeit von festen Isolierstoffen jedoch mehrere Tage, bis hin zu Monaten, in Anspruch nehmen.



**Abbildung 2.15.:**  $U$ - $I$ -Kennlinie eines Metalloxidvaristors, die Spannung ist auf den Blitzstoß-Schutzpegel (hier:  $U_{10\text{kA}}$ ) bezogen [Roc2009]

Leitfähigkeiten von Bedeutung sind. Daher wird im Folgenden die Darstellung mittels einer  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie, wie in Abbildung 2.16, gewählt. Vorteilhaft ist dabei, dass dieser Zusammenhang – spezifische Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Feldstärke – direkt an gängige Simulationsprogramme übergeben werden kann.



**Abbildung 2.16.:**  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie eines exemplarischen nichtlinearen Feldsteuermaterials, nach [Sec2017b]

Die gezeigte Kennlinie ließe sich nur in einem kleinen Bereich über ein einfaches Exponentialgesetz (vgl. Gleichung 2.5) beschreiben. Für die Simulation sinnvoll ist allerdings eine Modellierung, die das Material in allen drei Bereichen nachbilden kann. Ein entsprechendes Modell wurde in [Bla2014] und [Bla2015] vorgestellt. Es wurde ursprünglich zur Beschreibung mikrovaristorgefüllter Lacke erstellt und seitdem weiterentwickelt, um die Materialparameter typischer nichtlinearer Materialien zu integrieren [Hus2017], [Sec2017b]. Dabei handelt es sich nicht um eine physikalische Modellierung, sondern um



eine Anpassungsfunktion, die sich vor allem für die Feldsimulation über weite Bereiche der elektrischen Feldstärke bewährt hat. Dabei wird die spezifische elektrische Leitfähigkeit in der halblogarithmischen Darstellung über der Feldstärke durch drei Geraden angenähert. Die in Abbildung 2.16 gezeigte exemplarische Kennlinie wird durch Gleichung 2.6 ausgedrückt (weiterentwickelt aus [Bla2015]).

$$\kappa(E) = \kappa_0 \cdot \frac{\sqrt[N_1]{1 + 10^{(m-m_0)N_1(E-E_1)}} \cdot 10^{m_0 \cdot E}}{\sqrt[N_2]{1 + 10^{mN_2(E-E_2)}}} \quad (2.6)$$

Der Teil der Kennlinie in Bereich 1 wird hierbei durch die *spezifische Grundleitfähigkeit*  $\kappa_0$ , sowie die *Steigung*  $m_0$  der Kennlinie für geringe Feldstärken beschrieben. Oft wird nur ein Bereich für die spezifische Grundleitfähigkeit angegeben, was genügt, um sicherzustellen, dass die Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke nicht zu hoch ausfällt. Da die spezifische Grundleitfähigkeit im Kontext von Gleichung 2.6 den Wert der spezifischen Leitfähigkeit bei  $E = 0$  kV/mm (der keine praktische Bedeutung hat) beschreibt, wird die *spezifische Leitfähigkeit*  $\kappa_N$  bei Betriebsfeldstärke eingeführt.

Der Übergang der Kennlinie vom linearen oder moderat nichtlinearen Bereich 1 in den stark nichtlinearen Bereich 2 findet bei der *Schaltfeldstärke*  $E_1$  statt. Der Begriff der Schaltfeldstärke wird je nach Quelle unterschiedlich genutzt, beispielsweise auch als die Feldstärke, bei der eine bestimmte Stromdichte erreicht wird [Mül2012]. In dieser Arbeit ist damit allerdings immer der Schnittpunkt der beiden Tangenten an die Kennlinie in Bereich 1 und 2 (angedeutet in Abbildung 2.16) gemeint. Unabhängig von der Interpretation der Größe findet auch das Formelzeichen  $E_b$  häufige Verwendung in der Literatur.

Die Nichtlinearität der Leitfähigkeit in Bereich 2 wird häufig mit Hilfe des Nichtlinearitätsexponenten  $\alpha$  ausgedrückt. Dieser hat allerdings den Nachteil, in der  $\kappa$ - $E$ -Ebene nicht direkt abgelesen werden zu können. Daher wird in der hier genutzten Modellierung auf die *Steigung*  $m$  der Kennlinie zurückgegriffen. Diese kann mittels Gleichung 2.7 direkt aus der Kennlinie ermittelt werden und hat die Einheit mm/kV.

$$m = \frac{\log \frac{\kappa_b}{\kappa_a}}{E_b - E_a} \quad (2.7)$$

Der Übergang zu Bereich 3 wird durch die *Sättigungsfeldstärke*  $E_2$  markiert. Dabei handelt es sich um die Feldstärke, ab der die spezifische Leitfähigkeit eines Feldsteuermaterials nicht mehr bedeutend zunimmt und sich die *spezifische Sättigungsleitfähigkeit*  $\kappa_{\text{sat}}$  einstellt.

Um eine bessere Nachbildung von gemessenen Kennlinien zu erreichen, können die Transitionsparameter  $N_1$  und  $N_2$  angepasst werden, mittels derer sich die Übergänge zwischen den Bereichen 1 und 2, respektive 2 und 3 härter oder weicher einstellen lassen.

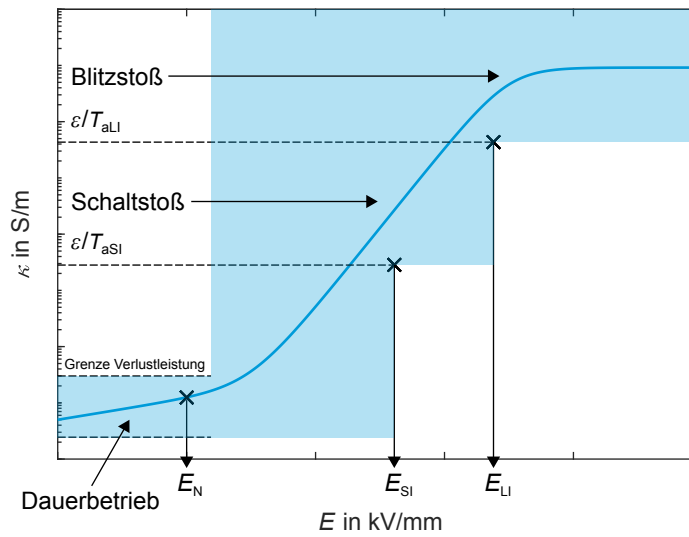
---

### 2.3.3 Strategie 1: Feldsteuerung über den gesamten Betriebsbereich

---

Die starke Nichtlinearität der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit einiger Feldsteuermaterialien wird im *Ansatz der Feldsteuerung über den gesamten Betriebsbereich* ausgenutzt. Die Idee wurde in ihren Grundzügen bereits früh entwickelt (siehe unter anderem [Vir1967], [Rhy1997]), um dann im Verlauf der Entwicklung von Mikrovaristoren verfeinert zu werden. Die Auslegung oder Auswahl eines Feldsteuermaterials wurde zu großen Teilen in der Abhandlung *Nonlinear Resistive Electric Field Grading Part*

1 beschrieben, an der sich dieser Abschnitt weitestgehend orientiert [Chr2010]. Allerdings werden an dieser Stelle nur die für Gleichspannungssysteme relevanten Informationen zusammengefasst.



**Abbildung 2.17.:** Auslegungsmethodik nichtlinearer FGMs nach Christen et al., nach [Chr2010]

Für die nichtlineare Feldsteuerung über den gesamten Betriebsbereich wird sich die Eigenschaft, z.B. von Mikrovaristoren, zunutze gemacht, dass die spezifische Leitfähigkeit mit steigender Feldstärke zunimmt (siehe Abbildung 2.17). Eine lokale Feldüberhöhung hat damit eine Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit zur Folge, die wiederum in einem elektrischen Strömungsfeld eine Verdrängung der Feldstärke bewirkt<sup>14</sup>. Es stellt sich ein Gleichgewicht ein, in dem die Feldverteilung vergleichmäßigt wird.

Dieser Effekt sollte, um eine zu starke Erhöhung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit und damit ein thermisches Weglaufen zu verhindern, nur sehr räumlich oder zeitlich begrenzt genutzt werden. Zum Beispiel sollte bei der Auslegung einer Kabelmuffe die mittlere Betriebsfeldstärke  $E_N$  entlang der Feldsteuerschicht (blau markiert in Abbildung 2.13) in den Bereich der Kennlinie fallen, die nur schwach nichtlinear ist, also unter der Schaltfeldstärke  $E_1$  liegen. Die mittlere Betriebsfeldstärke  $E_N$  bezeichnet dabei die über das Volumen des Feldsteuermaterials gemittelte Feldstärke. Dabei sollte nur der beanspruchte Teil des Materials in die Berechnung eingehen und nicht Bereiche die, z.B. durch vorgeschobene Elektroden, im Feldschatten liegen. Für eine erste Abschätzung von  $E_N$  genügt es häufig, die zulässige Betriebsdauergleichspannung  $U_{\text{rDC}}$  auf die zu steuernde Strecke zu beziehen, z.B. auf die Länge  $l$  in Abbildung 2.13.

Um auch bei transienten Überspannungen eine wirksame Feldsteuerung zu gewährleisten, muss das Material leitfähig genug werden, um die Ausbildung eines stationären Strömungsfeldes zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass die Relaxationszeitkonstante des Feldsteuermaterials kleiner sein muss als die Anstiegszeit  $T_a$  des Impulses (vgl. Gleichung 2.8). Bei Betrachtung einer genormten Blitzstoß- oder Schaltstoßspannung wird für  $T_a$  die Scheitelzeit von  $2 \mu\text{s}$ , respektive  $250 \mu\text{s}$  eingesetzt.

$$\tau = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\kappa} \ll T_a \quad (2.8)$$

<sup>14</sup> Dieser Effekt geht natürlich nicht iterativ vonstatten, erschließt sich aber auf diese Weise besser der Vorstellung.



---

Für die spezifische Leitfähigkeit ergibt sich damit die Bedingung nach Gleichung 2.9. Dabei sind  $\varepsilon_r$  und  $\kappa$  die Materialparameter des Feldsteuermaterials bei der sich einstellenden Feldstärke.

$$\kappa \gg \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r}{T_a} \quad (2.9)$$

Um also auch während einer Beanspruchung mit Blitzstoßspannung eine nichtlinear resistive Feldsteuerung zu erreichen, muss die spezifische Leitfähigkeit des Materials bei der mittleren Feldstärke  $E_{LI}$  – die sich entsprechend des Blitzstoßspannungspegels entlang der zu steuernden Strecke einstellt<sup>15</sup> – größer sein als  $\varepsilon/T_{aLI}$ . Dabei wird eine Sicherheitsmarge empfohlen [Chr2010]. Gewählt wurde hier ein Faktor von zehn. Für alle weiteren im System zu erwartenden transienten Belastungen, wie etwa Schaltstoßspannungen, kann analog vorgegangen werden.

Das sich ergebende Anforderungsprofil, das sich durch diese Art der Auslegung ergibt, ist vergleichsweise umfangreich und lässt teilweise nur wenige Materialien zu. Während beispielsweise bei Kabelmuffen mit der Länge der Muffe noch ein Freiheitsgrad existiert, um die Geometrie dem Material anzupassen, wird man diese Möglichkeit bei gasisolierten Systemen nur ungern nutzen, da hier eine Verlängerung der zu steuernden Strecke den Kapselungsdurchmesser erhöhen würde. Da viele der stark nichtlinearen Materialien eine verhältnismäßig hohe spezifische Grundleitfähigkeit (besonders bei der zu erwartenden Betriebstemperatur) oder eine Schaltfeldstärke von  $E_1 < 1 \text{ kV/mm}$  aufweisen, wird die *Feldsteuerung über den gesamten Betriebsbereich* derzeit nur in wenigen Betriebsmitteln der Hochspannungsebene eingesetzt. Verglichen mit anderen Methoden der Feldsteuerung bedeutet sie einen größeren Aufwand in der Auslegung. Dies kann aber durch die erzielbaren Ergebnisse gerechtfertigt sein, wie in Abschnitt 4.3 noch gezeigt wird.

---

### 2.3.4 Strategie 2: Reduktion der Ladungsträgeransammlung

---

Eine einfacher zu beherrschende Feldsteuermethode stellt die Nutzung moderat nichtlinearer Materialien zur *Reduktion der Ladungsträgeransammlung* dar. Die Beobachtung, dass bereits viele Isolierstoffe eine geringe Nichtlinearität der Leitfähigkeit aufweisen, die wiederum einen positiven Einfluss auf die Feldverteilung in Kabeln ausübt, wurde bereits in der Grundlagenliteratur festgehalten [Kre1995]. Das Prinzip lässt sich allerdings auch auf gasisolierte Gleichspannungssysteme übertragen [Sec2015].

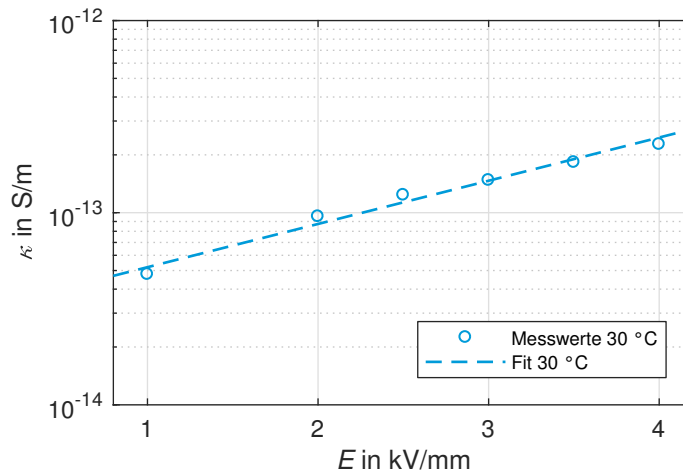
Als moderat nichtlineare Feldsteuermaterialien werden hier Materialien bezeichnet, die eine  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie ohne ausgeprägten Schalterpunkt aufweisen oder deren Schalterpunkt außerhalb des Feldstärkebereichs von Interesse liegt, und die eine Nichtlinearität der Grundleitfähigkeit zwischen  $m_0 = 0,1 \text{ mm/kV}$  und  $1 \text{ mm/kV}$  zeigen. Ein Beispiel hierfür ist der Verbundstoff aus einem Prototypen aus der Iriotec®-Materialklasse und Epoxidharz, dessen Kennlinie in Abbildung 2.18 dargestellt ist.

Die spezifische Leitfähigkeit dieser Materialien liegt bereits bei geringen Feldstärken etwas über der von ungefüllten oder *nicht-funktionell* gefüllten Polymeren<sup>16</sup>, wodurch sich bereits eine robustere Steue-

---

<sup>15</sup> Auch hier wird vereinfacht der Scheitelwert der Spannung, in diesem Fall  $U_{LI}$ , auf die Länge  $l$  bezogen.

<sup>16</sup> Epoxidharze werden aus Kostengründen und um bessere mechanische oder thermische Eigenschaften zu erzielen fast immer gefüllt. Diese Füllstoffe zielen aber nicht auf bewusste elektrische Eigenschaftsänderungen ab und werden im Rahmen dieser Arbeit als *nicht-funktionelle Füllstoffe* bezeichnet.



**Abbildung 2.18.:**  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie eines moderat nichtlinearen Feldsteuermaterials, angenähert mit  $m_0 = 0,225 \text{ mm/kV}$ , nach [Sec2015]

rung der Potentialverteilung ergibt, da Einflüsse wie die Ladungstransportmechanismen in Gasen oder entlang von Grenzflächen weniger stark ins Gewicht fallen.

In einem Isoliersystem, das Temperaturdifferenzen ausgesetzt ist, wie beispielsweise einem gasisolierten System (vgl. Abschnitt 2.1.1), kann die moderate Nichtlinearität dem Temperatureinfluss entgegenwirken. Durch die höhere Temperatur in der Nähe des Innenleiters stellt sich dort eine erhöhte spezifische Leitfähigkeit ein, die wiederum das Feld in den kälteren, weniger leitfähigen Bereich verdrängt. Die lokal erhöhte Feldstärke führt wiederum zu einer Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit im äußeren Bereich der Isolierung. Bei der richtigen Wahl der Materialparameter stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem es zu einer gleichmäßigen Feldverteilung entlang des Isolators kommt, wodurch die Beanspruchung der Isolierstrecke im Dauerbetrieb reduziert wird.

Die Feldverteilung ähnelt durch den oben beschriebenen Effekt stärker der kapazitiven Feldverteilung als im ungesteuerten Fall. Dies bedeutet, dass sich weniger Raum- und Flächenladungen im Dauerbetrieb ansammeln, die, wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, zu einer Erhöhung der Maximalfeldstärke bei Überspannungen führen können.

Diese Art der Feldsteuerung kann im Fall von überlagerten Überspannungen nicht genauso effektiv sein wie die *Feldsteuerung über den gesamten Betriebsbereich*, da sich bei transienten Überspannungen kein stationäres Strömungsfeld ausbilden kann und damit in dieser Situation kein Vergleichmäßigungseffekt durch die Nichtlinearität vorliegt. Dies wird in Kapitel 4 noch simulativ nachgewiesen.

Als Vorteil ist allerdings zu nennen, dass ein Material ohne ausgeprägten Schaltpunkt genutzt werden kann, was die Auslegung und Herstellung des Feldsteuermaterials vereinfacht. Zudem sind die benötigten Materialien tendenziell auch mit geringerer spezifischer Grundleitfähigkeit herstellbar als dies derzeit bei stark nichtlinearen Feldsteuermaterialien möglich ist. Hierdurch sinkt die Wahrscheinlichkeit einer Fehlauslegung, die zu einem thermischen Weglaufen des gesamten Isoliersystems führen könnte. Daher soll auch dieser bereits in der Vergangenheit am Fachgebiet Hochspannungstechnik der TU Darmstadt untersuchte Ansatz weiter verfolgt werden (vgl. [Ten2015]).

---

## 3 Motivation und Ziele der Arbeit

Wie bei Betrachtung des derzeitigen Wissensstandes auffällt (vgl. Kapitel 2), ist die Feldverteilung ungesteuerter Isoliersysteme bei Gleichspannungsbeanspruchung nur schwer im Vorfeld zu berechnen und zudem von vielen Faktoren abhängig. Durch die Nutzung von Feldsteuermaterialien können Isoliersysteme mit einer robusteren und vorteilhafteren Feldverteilung entwickelt (vgl. [Chr2013]) und sogar der Designprozess vereinfacht werden. Ein aus Ingenieurssicht intuitives Vorgehen besteht daher darin, eine zulässige Verlustleistung im Isoliersystem umzusetzen, um dieses zu kontrollieren, anstatt es als „Spielball“ den Umgebungsbedingungen zu überlassen.

Trotzdem werden derzeit gerade im Bereich der Höchstspannungsebene nur sehr vereinzelt Feldsteuermaterialien eingesetzt, obwohl der mögliche Nutzen hier besonders ausgeprägt wäre. Ein Grund hierfür kann sein, dass speziell die Auslegung von nichtlinearen Feldsteuermaterialien bisher nicht normativ aufgearbeitet wurde. Über die verwendeten Begriffe und die Methoden zur Ermittlung der Materialparameter besteht kein allgemein anerkannter Standard. Hinzu kommt, dass die Nutzung von nichtlinearen Feldsteuermaterialien bei ungünstiger Auslegung Risiken birgt, die herkömmliche Isolierstoffe nicht aufweisen. So kann durch eine zu hoch gewählte spezifische Grundleitfähigkeit des Feldsteuermaterials eine Eigenerwärmung verursacht werden, die bereits im Dauerbetrieb zu einer Zerstörung des Betriebsmittels führen kann. Dass beispielsweise die spezifische Grundleitfähigkeit derzeit von jedem Hersteller auf unterschiedliche Weise ermittelt wird, ist aus Sicht des Isoliersystemdesigns ein unnötiges Hindernis. Weiterhin ist die Palette an kommerziell vertriebenen Feldsteuermaterialien mit geringer spezifischer Grundleitfähigkeit und hoher Schaltfeldstärke zum jetzigen Zeitpunkt noch sehr überschaubar.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich als vorrangiges Ziel der Arbeit, einen systematischen Entwurfsprozess für nichtlinear gesteuerte Gleichspannungsisoliersysteme zu entwickeln. Hierdurch soll die Basis für einen breiteren zukünftigen Einsatz von nichtlinearen Feldsteuermaterialien geschaffen werden.

Mit Blick auf dieses Ziel ergeben sich die folgenden Aufgaben und Teilziele:

- Das Vorgehen der Auslegung beziehungsweise der Auswahl von Feldsteuermaterialien für ein gegebenes Gleichspannungsisoliersystem soll anhand eines konkreten Beispiels aufgezeigt werden. Gewählt wurde das Isoliersystem einer gasisolierten Leitung für Gleichspannung. Dieser Fall ist besonders interessant, da die auftretenden Feldstärken bei einer wirtschaftlichen, kompakten Bauweise sehr hoch sind und zudem eine empfindliche Gas-Feststoff-Grenzfläche im Isoliersystem existiert. Hierbei soll vor allem folgende Frage beantwortet werden:

**Welche Informationen über ein Feldsteuermaterial sind wichtig, um dieses erfolgreich im Design eines Isoliersystems einzusetzen?**

Dies beinhaltet auch die Aufgabe, eine Nomenklatur für die relevanten Materialparameter zu erarbeiten, der bereits in Abschnitt 2.3.2 vorgegriffen wurde.

- Neben der Identifikation der relevanten Materialparameter und der Methoden zu deren Bestimmung ist auch ein Anforderungskatalog für ein Feldsteuermaterial für den Einsatz in gasisolierten

Systemen zu erstellen. Der Einsatz des Materials soll eine Vergleichmäßigung der Feldverteilung im Dauerbetrieb gewährleisten und die höchsten auftretenden elektrischen Feldstärken entlang des Isolators im härtesten Prüfzenario (vgl. Kapitel 4) deutlich reduzieren – dem der Blitzstoßspannung, die sich der Betriebsspannung mit umgekehrter Polarität überlagert. Gleichzeitig darf das Betriebsmittel nicht durch die Eigenerwärmung gefährdet werden, sei es durch Überschreiten einer kritischen Temperatur für die beteiligten Materialien oder durch thermisches Weglaufen. Dies soll mit Hilfe von stationären und transienten Simulationen unter Einbezug der nichtlinearen Materialeigenschaften potentieller Feldsteuermaterialien nachgewiesen werden.

- Da der Einsatz von stark nichtlinearen Feldsteuermaterialien bedeutet, dass Teile des Isoliersystems ihre Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Betriebs- oder Fehlerspannung verändern, können sich Konsequenzen für die Prüfbarkeit der Betriebsmittel ergeben. Diese sind zu ermitteln und zu diskutieren. Unter diesem Gesichtspunkt muss auch die Sinnhaftigkeit der aktuell diskutierten Prüfungen bewertet werden.
- Ebenfalls ist im Rahmen der Auslegung zu klären, ob der Einsatz der Feldsteuermaterialien dahingehend optimiert werden kann, dass möglichst wenig Materialeinsatz nötig ist; einerseits, da überperkolativ gefüllte Polymere spröder sind als weniger hoch gefüllte Verbundstoffe, andererseits um Kosten durch spezielle Füllstoffe in vertretbaren Grenzen zu halten.
- Die zweite zu beantwortende Kernfrage lautet:

**Wie können die benötigten Informationen durch Messungen am Feldsteuermaterial gewonnen werden?**

Dieses Wissen ist nötig, um als Hersteller in der Lage zu sein, die relevanten Materialparameter potentiellen Kunden zur Verfügung zu stellen, oder um im Rahmen des Isoliersystemdesigns verifizierende Messungen durchzuführen. Dabei soll vor allem der Blick auf die möglichen Einflussfaktoren auf die teils sensiblen Messungen geschärft werden, die bisher noch in vergleichsweise geringem Maße Einzug in die Literatur gehalten haben. Weiterhin ist aufzuzeigen, welche Messungen sich besonders für eine schnelle Bewertung potentieller neuer Füllstoffe eignen, um die Rückkopplungsschleife zur Materialentwicklung möglichst kurz zu halten. Hierbei soll auch untersucht werden, ob sich die Ergebnisse von Messungen an Füllstoffen und an den daraus hergestellten Feldsteuermaterialien vergleichen lassen.

- Mittels der untersuchten Messmethoden sind eine Reihe derzeit verfügbarer oder in der Entwicklung befindlicher Feldsteuermaterialien und Füllstoffe zu prüfen und auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz in Gleichspannungsisoliersystemen für gasisolierte Leitungen oder Schaltgeräte hin zu bewerten. Neben den rein elektrischen Prüfungen sollen auch materialwissenschaftliche Aspekte beleuchtet werden mit dem Ziel, die Zusammenhänge zwischen Materialstruktur und elektrischen Eigenschaften zu verstehen. Abschließend sollen diese Ergebnisse genutzt werden, um Hinweise für die Weiterentwicklung der Materialien abzuleiten und damit langfristig zur Erweiterung der Palette an verfügbaren Feldsteuermaterialien beizutragen. Die vorliegende Arbeit soll damit ein Bindeglied zwischen der elektrotechnischen und der materialwissenschaftlichen Seite der Entwicklung neuartiger Feldsteuermaterialien für kompakte Gleichspannungsisoliersysteme darstellen.

---

## 4 Auslegung nichtlinearer Feldsteuermaterialien

Feldsteuermaterialien müssen gezielt auf eine Anwendung hin entwickelt oder zumindest ausgewählt werden. Dies soll im Folgenden am Beispiel von Isolatoren für gasisolierte Leitungen oder Schaltanlagen für eine nominelle Gleichspannung von 500 kV durchgeführt werden. Das Ziel der Auslegung ist einerseits das Aufzeigen des strukturierten Designprozesses von nichtlinearen Feldsteuermaterialien für Gleichspannungssysteme, andererseits sollen die konkreten Anforderungen<sup>1</sup> an mögliche Feldsteuermaterialien für das vorliegende Beispielsystem in Form von zulässigen Bereichen für die Materialparameter herausgearbeitet werden.

Hierzu werden zuerst das Beispielisoliersystem vorgestellt und die Anforderungen daran zusammengefasst. Der Fokus liegt dabei auf den in dieser Arbeit behandelten dielektrischen Anforderungen. Weiterhin wird die Auslegung von Feldsteuermaterialien nach beiden in Abschnitt 2.3 beschriebenen Strategien durchgeführt. Da die maximal zulässige spezifische Leitfähigkeit im Dauerbetrieb eine von der Feldsteuerstrategie unabhängige und wesentliche Größe darstellt, wird ihre Ermittlung den beiden Unterkapiteln zur Auslegung vorangestellt.

Bestandteil der Auslegung ist auch die Betrachtung der Konsequenzen des Einsatzes nichtlinearer Feldsteuermaterialien auf die Prüfbarkeit von Betriebsmitteln. Das Kapitel abschließen werden Betrachtungen zum volumenoptimierten Einsatz von Feldsteuermaterialien und zur erzielbaren Resilienz gegenüber Fremdkörpern im Isoliersystem.

---

### 4.1 Anforderungen an das Beispielisoliersystem

---

Gasisolierte Leitungen und Schaltanlagen stellen ein interessantes Beispiel für die Auslegung von nichtlinearen resisitiven Feldsteuermaterialien für Gleichspannungsisoliersysteme dar. Zum einen besteht bei der Wahl der geometrischen Abmessungen der Isolatoren kein großer Spielraum. Eine Verlängerung der zu steuernden Grenzfläche bringt eine quadratische Vergrößerung des Volumens mit sich, wodurch mehr Isoliergas benötigt wird. Auch steigt der Materialeinsatz des Aluminiums für die Kapselung. Die Bereitschaft, den Außendurchmesser eines solchen Systems zu erhöhen, wird zudem durch den erhöhten Aufwand bei Transport und Verlegung weiterhin gesenkt. Zum anderen existiert im Betrieb ein Temperaturgradient entlang der zu steuernden Strecke, was, wie in Abschnitt 2.1.1 gezeigt wurde, zu einer Erhöhung der auftretenden Feldstärken beitragen kann.

Das Isoliersystem einer gasisolierten Leitung kann beispielsweise aussehen wie in Abbildung 2.1 für den Fall eines Schottisolators dargestellt. Bei einer Planung des Systems für eine nominale Spannung

---

<sup>1</sup> Behandelt werden hier nur die elektrischen Eigenschaften. Es soll jedoch erwähnt werden, dass die Anforderungen an ein Feldsteuermaterial darüber hinausgehen. So muss es beispielsweise eine ausreichende Temperaturbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit aufweisen, über geeignete mechanische Eigenschaften verfügen und möglichst kostengünstig sowie ausreichend verfügbar sein.

von  $U_{\text{nDC}} = 500 \text{ kV}$  würden nach dem Stand der Technik Innenleiter mit einem Durchmesser im Bereich von 12 bis 14 cm und Kapselungen mit einem Innendurchmesser im Bereich von 60 bis 80 cm vorgesehen werden. Bei den folgenden Auslegungen wird hier jeweils der kleinere und damit anspruchsvollere Fall zugrunde gelegt, um die Einsatzfähigkeit der Feldsteuermaterialien für zukünftige Systeme sicherzustellen.

Um eine Gleichstromleitung wirtschaftlich zu betreiben, sollte diese möglichst immer hoch ausgelastet sein. Daher wird davon ausgegangen, dass der Innenleiter eine gegenüber der Kapselung erhöhte Temperatur aufweist. In der Literatur wird hier von Temperaturdifferenzen zwischen 20 und 30 K ausgegangen [Gra2009], [Ten2016]. Auch hier wird mit einer Temperaturdifferenz von 30 K der anspruchsvollere Fall vorausgesetzt. Die Leitung sollte für eine große Spanne an Umgebungsbedingungen, die vor allem für die absoluten Temperaturen im Isoliersystem eine Rolle spielen, einsetzbar sein.

Die möglichen auftretenden Überspannungen, die sich für ein gasisoliertes System für Gleichspannungsanwendungen ergeben, sowie die sich daraus ableitenden Prüfungen sind in der Fachwelt zum jetzigen Zeitpunkt Gegenstand der Diskussion und werden in der Cigré-Arbeitsgruppe D1/B3.57 erarbeitet. Eine Zusammenfassung der aktuellen, im Rahmen dieser Arbeit relevanten Anforderungen ist in Tabelle 4.1 gegeben [Cig2018].

**Tabelle 4.1.: Prüfparameter für gasisolierte Gleichstromleitungen nach [Cig2018]**

Prüfung/Spannung	Prüfparameter
Zulässige Betriebsdauergleichspannung: $U_{\text{rDC}}$	$U_{\text{rDC}} = (1,05 \dots 1,1) \cdot U_{\text{nDC}}$
Geforderte Stehgleichspannung: $U_{\text{rwDC}}$	$U_{\text{rwDC}} = 1,5 \cdot U_{\text{rDC}}$ , in beiden Polaritäten für eine Minute zu halten
Teilentladungsmessung AC	Vorbelastung mit $\hat{U} = 1,5 \cdot U_{\text{rDC}}$ für eine Minute, TE-Messung mit $\hat{U} = 1,2 \cdot U_{\text{rDC}}$ für eine Minute
Teilentladungsmessung DC	Vorbelastung mit $U = 1,5 \cdot U_{\text{rDC}}$ für eine Minute, TE-Messung mit $U = 1,2 \cdot U_{\text{rDC}}$ für eine Minute
Prüfung mit überlagerter Blitz-/Schaltstoßspannung	$U_{\text{rDC}}$ für 2 h, Superposition von Blitz- und Schaltstoß (unipolar und bipolar) ( $U_{\text{LI}} \approx 3 \cdot U_{\text{rDC}}$ ; $U_{\text{SI}} \approx 2 \cdot U_{\text{rDC}}$ ), nicht-bestromter Innenleiter
<i>Insulation System Test</i>	Bestromter Innenleiter, Temperaturgradient entlang des Isoliersystems, $U_{\text{rDC}}$ bis res. Strömungsfeld eingestellt, Superposition von Blitz- und Schaltstoß (uniolar und bipolar)

Es werden aus der Wechselspannungstechnik bekannte Prüfungen wie die Stehspannungsprüfung der Betriebsmittel vorgeschlagen, aber auch den speziellen Phänomenen bei Gleichspannung Rechnung getragen. So sollen zukünftige gasisolierte Gleichspannungssysteme auch den sogenannten *Insulation System Test* durchlaufen, bei dem der im Betrieb zu erwartende Temperaturgradient eingestellt wird und eine ausreichend lange Vorbelastung mit Gleichspannung durchgeführt wird, um ein (weitestgehendes) Einstellen der resistiven Feldverteilung zuzulassen. Anschließend sollen der Gleichspannung Blitz- und Schaltstöße (sowohl mit Betriebspolarität als auch von entgegengesetzter Polarität) überlagert werden,



---

was, wie in Abschnitt 2.1.1 erwähnt wurde, einen Worst-Case für das Isoliersystem darstellt. Die in Tabelle 4.1 angegebenen Prüfspannungspegel sind dabei immer von 0 V aus zu sehen<sup>2</sup>.

Die in den folgenden Abschnitten simulativ untersuchten Betriebs- und Überspannungsszenarien orientieren sich an den vorgeschlagenen Prüfungen. Allerdings wurden vorrangig die Tests übernommen, die sich aus dem realen Betrieb bzw. realistischen Überspannungen ableiten. Während mancher Prüfungen, wie etwa der mit erhöhter Wechselladung zum Detektieren von Teilentladungen, kann ein ausgeprägter Steuereffekt durch das Feldsteuermaterial sogar unerwünscht sein. Dies wird in Abschnitt 4.3.4 weiter ausgeführt.

Das Ziel der Auslegung der Feldsteuermaterialien besteht darin, die auftretenden Maximalfeldstärken im Isoliersystem soweit zu begrenzen, dass bei den Prüfungen kein dielektrisches Versagen zu erwarten ist. Anhand von Feldsimulationen ist dies nicht eindeutig zu bewerten, da es zur Festigkeit entlang von Grenzflächen in Isoliergasen nur wenige Hinweise im Schrifttum gibt. Daher existieren auch keine eindeutigen Angaben zu zulässigen Designfeldstärken. Beispielsweise wird empfohlen, in der Umgebung von Tripelpunkten in SF<sub>6</sub> bei 5 bar nur Feldstärken von < 0,5 kV/mm zuzulassen [Vol2004], was allerdings als sehr konservativ anzusehen ist. Grenzflächenüberschläge entlang kurzer Strecken konnten ab einer Tangentialfeldstärke von 10 kV/mm beobachtet werden (ebenfalls in SF<sub>6</sub> bei 5 bar) [Zav2014]. Daher wird im Folgenden durch den Einsatz des Feldsteuermaterials prinzipiell eine Vergleichmäßigung der Feldverteilung entlang der Grenzfläche der Isolatoren angestrebt. Sofern möglich soll die Maximalfeldstärke unter 10 kV/mm gehalten und die Umgebung der Tripelpunkte im Vergleich zum übrigen Volumen entlastet werden.

---

## 4.2 Ermittlung der zulässigen spezifischen Leitfähigkeit im Dauerbetrieb

---

Dass durch den Einsatz von Feldsteuermaterialien eine Verbesserung der Feldverteilung erzielt werden kann, wurde in Abschnitt 2.3 bereits angedeutet und soll in den folgenden Abschnitten konkret am Beispiel von Isolatoren für gasisolierte Systeme gezeigt werden. Allerdings darf der potentielle Nutzen nicht durch das Risiko des thermischen Weglaufens erkauft werden. Dieses besteht, wenn ein Material eingesetzt wird, welches im Dauerbetrieb eine zu hohe spezifische elektrische Leitfähigkeit aufweist. Durch die umgesetzte Verlustleistung kommt es zu einer Eigenerwärmung und im Gegenzug zu einem weiteren Anstieg der spezifischen Leitfähigkeit. Je nach der Fähigkeit des Systems, Wärmeleistung abzutransportieren, stellt sich in der Folge ein stabiler oder instabiler Zustand ein.

Da ein gasisoliertes System aufgrund seiner großen Oberfläche und der konvektiven Kühlung durch das Isoliergas in der Lage ist, eine hohe Wärmeleistung abzuführen, kann eine gewisse Eigenerwärmung der Isolatoren zugelassen werden. Die zulässige Verlustleistung und die damit verknüpfte spezifische elektrische Leitfähigkeit sollen im Folgenden möglichst genau ermittelt werden. Die bisherigen Schätzungen über die zulässige spezifische Leitfähigkeit sind sinnvollerweise konservativer Natur. Hierdurch ist schwer abzuschätzen, wie groß die eingeplante Sicherheitsmarge in Bezug auf die spezifische Leitfähigkeit tatsächlich ausfällt, und der Spielraum bei der Auslegung und Auswahl von potentiellen Materialien wird verkleinert. Dieser sollte allerdings aus zwei Gründen möglichst groß gehalten werden: Zum einen steigt die Robustheit des Isoliersystems, wenn das Feldsteuermaterial eine signifikant höhere spe-

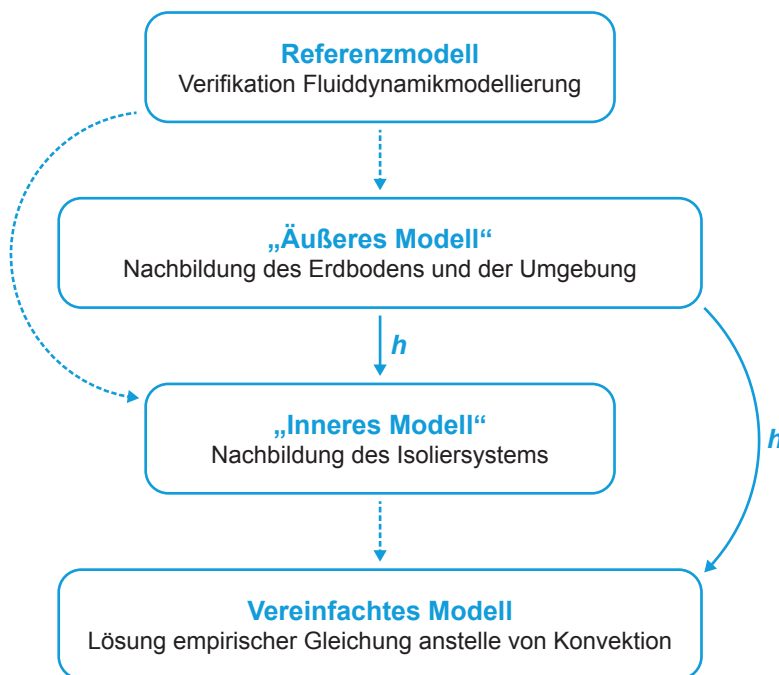
---

<sup>2</sup> Im Gegensatz zur Darstellung in der Kabelliteratur, in der die überlagerten Impulse auf die vorangegangene Dauerspannung bezogen werden.

zifische Leitfähigkeit als die umgebenden Materialien aufweist. Wie in den Grundlagen beschrieben (vgl. Abschnitt 2.1.3), kann die spezifische Leitfähigkeit des umgebenden Isoliergases bei trockenen Bedingungen  $10^{-17}$  S/m erreichen, für größere Gasfeuchten aber auch deutlich höhere Werte annehmen. Daher, und um den Einfluss der spezifischen Oberflächenleitfähigkeit gering zu halten (vgl. Abschnitt 2.1.4), sollte die spezifische Leitfähigkeit des Feldsteuermaterials einen Wert von mindestens  $10^{-14}$  S/m aufweisen. Zum anderen zeigen die bisherigen Messungen (vgl. Abschnitt 6.1.1), dass die spezifische Leitfähigkeit von Verbundstoffen auf Basis funktioneller Füllstoffe anscheinend nicht beliebig niedrig eingestellt werden kann.

Aus diesen Überlegungen heraus wurde beschlossen, eine thermische Untersuchung des Isoliersystems einer gasisolierten Leitung durchzuführen. Von besonderem Interesse ist diese Betrachtung für erdverlegte Systeme. Diese können beispielsweise eine Option darstellen, um beim geplanten Netzausbau in Deutschland auf sichtbare Freileitungen zu verzichten.

Für einfache Anordnungen, wie konzentrische Rohrleiter, existieren empirische Gleichungen zum Abschätzen des Wärmetransports (vgl. [VDI2013]). Diese basieren darauf, den Gasraum als einen Festkörper mit temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeit nachzubilden, wodurch die örtliche Abhängigkeit der konvektiven Strömung entlang von Isolatoren vernachlässigt würde. Eine solche Vereinfachung senkt den Rechenaufwand der geplanten Untersuchung deutlich, allerdings ist im Vorfeld nicht absehbar, wie groß der resultierende Fehler ausfallen wird. Daher wird ein Modell entwickelt, welches die konvektive Gasströmung berücksichtigt, und ein weiteres Modell auf Basis der empirischen Gleichungen. Bei ausreichender Übereinstimmung kann dann das vereinfachte Modell weiter genutzt werden.



**Abbildung 4.1.:** Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur Ermittlung der zulässigen spezifischen Grundleitfähigkeit

Vor der eigentlichen Simulation muss geprüft werden, ob die Nachbildung der freien Konvektion mit Hilfe des gewählten Simulationsprogramms, COMSOL Multiphysics®, mit ausreichender Genauigkeit erfolgt. Hierzu wurde ein Referenzmodell nachgerechnet. Anschließend wurde das eigentliche Problem in

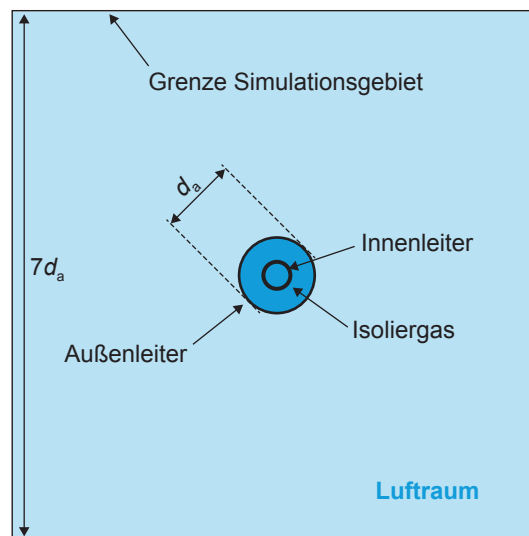


zwei Teile zerlegt. Die Simulation der Umgebung (*Äußeres Modell*) und des Innenlebens der GIL (*Inneres Modell*) wurden getrennt durchgeführt, um den Rechenaufwand zu begrenzen. Die Verbindung der Modelle wurde vereinfacht durch den Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  realisiert. Die Arbeitsschritte sind in Abbildung 4.1 schematisch gegliedert.

### Referenzmodell

Um die Nachbildung der freien Konvektion zu prüfen, wird ein in der Literatur häufig herangezogenes Modell genutzt. Hierbei handelt es sich um ein Stück luftverlegter gasisolierter Leitung, welches unter kontrollierten Umgebungsbedingungen untersucht wurde, und für das bereits Mess- und Simulationsergebnisse vorliegen [Min1986], [Wu2013].

Das Schnittbild des Modells ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Begrenzung des Luftraums auf ein Quadrat mit einer Kantenlänge, die dem siebenfachen des Rohrdurchmessers entspricht, trägt dem Umstand Rechnung, dass die Messungen an der GIL in einem abgeschlossenen Zelt stattfanden. Alle Parameter der Simulation werden entsprechend der damals gewählten Versuchsbedingungen eingestellt. Auf dem Rand des Simulationsgebiets wird die gemessene Umgebungstemperatur als Funktion der Zeit vorgegeben [Min1986]. Da es sich um eine AC-GIL handelt, wird sowohl auf dem Innenleiter als auch auf der Kapselung ein Strom eingeprägt. Die Dimensionen der Referenzleitung sind mit denen der später zu untersuchenden Geometrie vergleichbar, wodurch sich ähnliche Strömungsverhältnisse einstellen sollten.

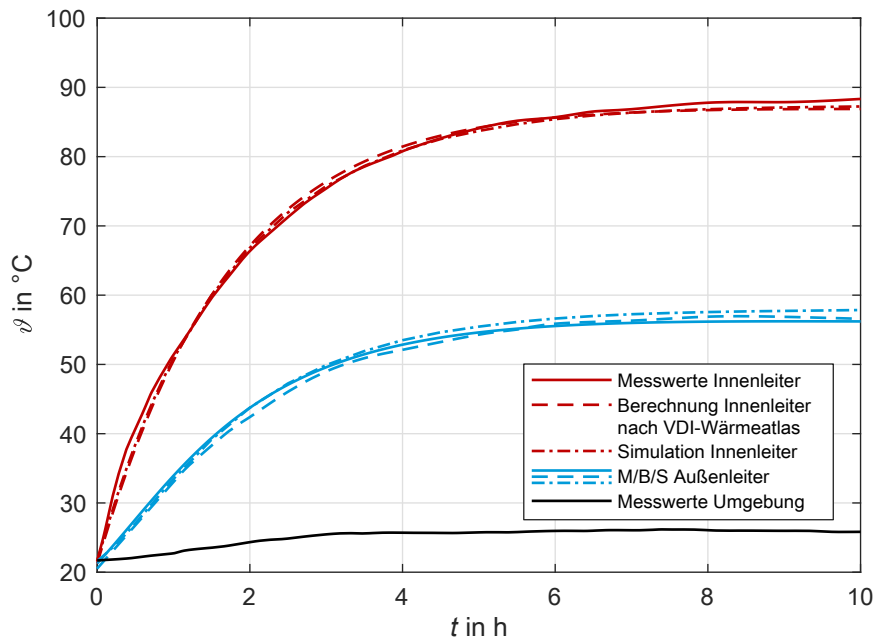


**Abbildung 4.2.:** Schnittbild des Referenzmodells zur Validierung der Simulation der freien Konvektion, nach [Trau2017\*]

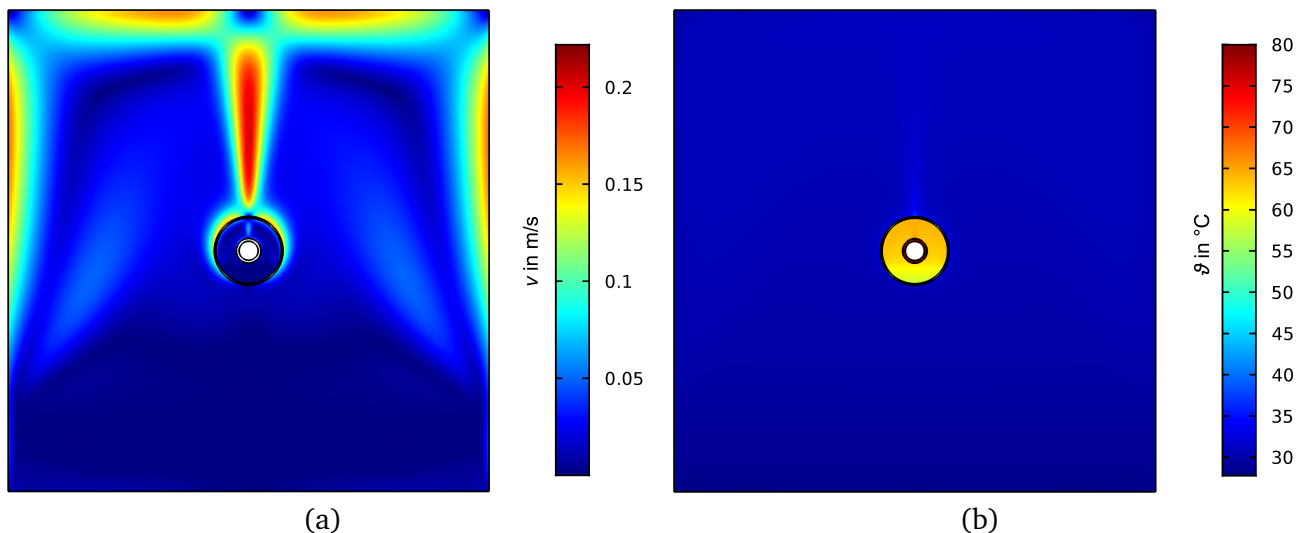
Zur Modellierung der Wärmeübertragung zwischen Innen- und Außenleiter sowie zwischen Außenleiter und dem Rand des Simulationsgebiets werden freie Konvektion und Wärmestrahlung berücksichtigt. Auf diese Weise wird die Zulässigkeit der Nachbildung des konvektiven Wärmeübergangs für Luft und  $\text{SF}_6$  geprüft.

Die Simulation wird transient über einen Zeitraum von 10 h durchgeführt und die Temperaturentwicklung mit den Messwerten aus der Literatur verglichen [Min1986]. Weiterhin wird die Anordnung mit Hilfe empirischer Gleichungen berechnet (vgl. [VDI2013]), um eine weitere Bestätigung des Modells

zu erhalten. Die Temperaturverläufe sind in Abbildung 4.3 einander gegenübergestellt. Dabei ist anzumerken, dass die Messwerte einer weiteren Ableseungenauigkeit durch die Extraktion aus dem alten Schrifttum unterliegen.



**Abbildung 4.3.:** Temperaturverläufe von Innen- und Außenleiter des Referenzmodells [Trau2017\*], die Messwerte wurden aus [Min1986] abgelesen



**Abbildung 4.4.:** (a) Geschwindigkeitsverteilung nach 10 h im Referenzmodell, (b) Temperaturverteilung nach 10 h im Referenzmodell, beide [Trau2017\*]

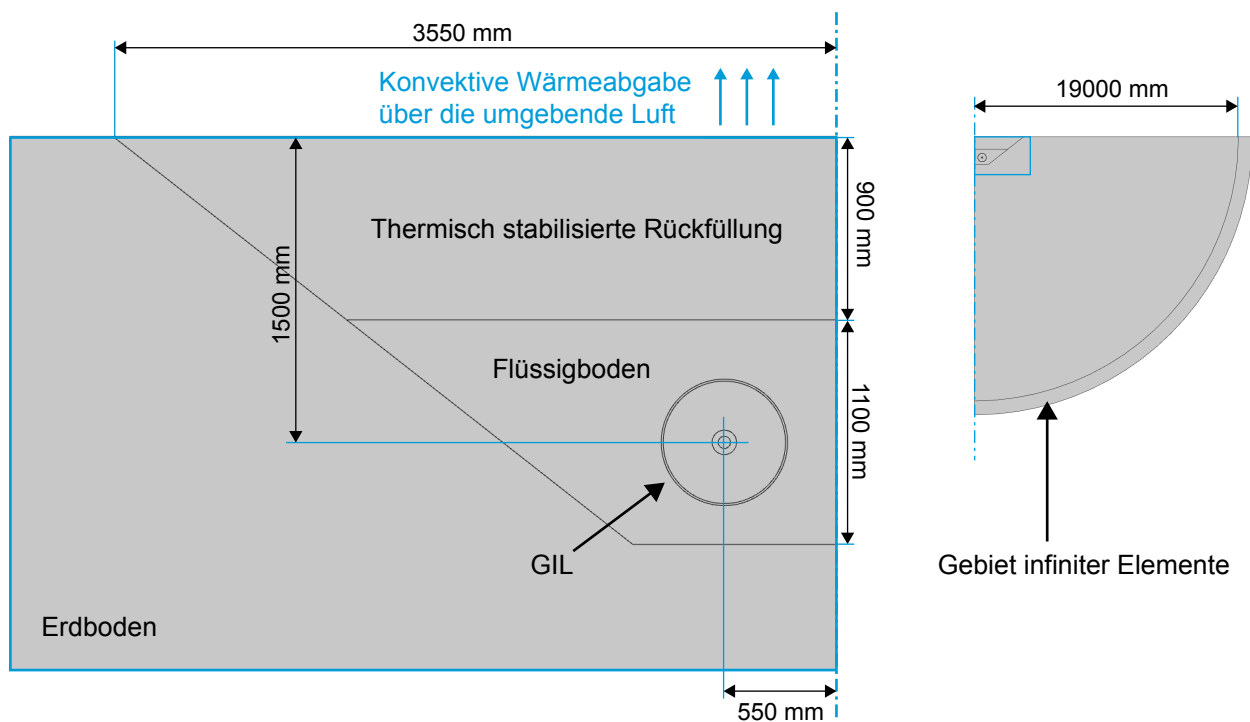
Es lässt sich erkennen, dass sowohl der zeitliche Verlauf als auch die absoluten Werte im stationären Zustand gut wiedergegeben werden. Die maximale stationäre Abweichung der Simulationsergebnisse gegenüber den Messwerten tritt am Innenleiter auf und beträgt 1,27 K. Im Rahmen der Messunsicherheit und der zusätzlichen Ableseungenauigkeit ist das Modell damit als ausreichend genau zu bewerten.

Als weitere Prüfung der Plausibilität sind in Abbildung 4.4 die Temperaturverteilung und die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit nach 10 h visualisiert<sup>3</sup>. Über den Wärmequellen ist im jeweiligen Gasraum ein Bereich erhöhter Fluidgeschwindigkeit und Temperatur festzustellen, was für die Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion zu erwarten ist und damit ebenfalls eine Bestätigung für das Modell darstellt.

### Modellierung der Umgebung der GIL

Die Abgabe der Verlustleistung eines Isolators wird auch dadurch bestimmt, wie gut das Gesamtsystem in der Lage ist, Wärmeleistung an seine Umgebung abzuführen. Um dies abschätzen zu können, wird die gasisolierte Leitung (ohne Berücksichtigung von Isolatoren) inklusive des umgebenden Bodens in der Simulation nachgebildet. Da sich die Geometrie bei Vernachlässigung der Isolatoren vereinfacht, kann dieses Problem zweidimensional modelliert werden. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, einen realistischen Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  zwischen Kapselung und umgebender Luft (als Referenz) zu ermitteln. Dieser kann bei den komplexeren dreidimensionalen Simulationen des Innenraums der GIL eingesetzt werden, um das Simulationsgebiet zu verkleinern und damit Rechenzeit zu sparen.

Das genutzte Modell orientiert sich am aktuell geplanten Vorgehen bei der Verlegung gasisolierter Leitungen, die unterirdisch verlegt werden sollen, um eine hohe Akzeptanz von HGÜ-Trassen zu erzielen (vgl. [Ten2016]). Eine schematische Darstellung des Modells kann Abbildung 4.5 entnommen werden.



**Abbildung 4.5.:** Schematische Darstellung der Umgebung der GIL (*Äußeres Modell*), nach [Trau2017\*], [Ten2016]

Unbehandelte Erdböden können je nach ihrer Zusammensetzung ein großes Spektrum thermischer Leitfähigkeiten aufweisen. Weiterhin hängt diese, je nach Zusammensetzung des Bodens, in unterschied-

<sup>3</sup> Die Temperatur wurde dabei zur besseren Darstellung des Effekts der Konvektion auf 80 °C beschränkt, die höchste im Modell ermittelte Temperatur betrug 87,28 °C.

licher Ausprägung von dessen Feuchte ab. Als konservative Abschätzung hat sich durchgesetzt, von einer thermischen Leitfähigkeit von  $\lambda_{\text{Boden,t}} = 0,4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  für trockenen und  $\lambda_{\text{Boden,f}} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  für feuchte Böden auszugehen, was in der Literatur als Zweischichtmodell bezeichnet wird [DIN0276]. Die Grenze zwischen feuchtem und trockenem Boden wird durch die *Grenzübertemperatur* definiert, die mit 15 K abgeschätzt wird. D.h. ab einer gegenüber der Referenztemperatur (im Folgenden 20 °C) um 15 K erhöhten Temperatur wird der Boden als ausgetrocknet angesehen. Diese Abschätzungen sind als konservativ einzuschätzen<sup>4</sup>. Üblicherweise wird das Ziel der thermischen Auslegung sein, eine Austrocknung des Bodens um eine GIL nicht oder nur in geringem Ausmaß zuzulassen. Die Austrocknung verschlechtert die Wärmeabfuhr und stellt eine Gefährdung der Bodenfauna dar.

Um die Austrocknung des Bodens zu verhindern, wird die GIL in einen Flüssigboden gebettet, der eine hohe thermische Leitfähigkeit aufweist und nicht zur Austrocknung neigt. Auf diese Weise wird die Kühlfläche um die Leitung vergrößert und die Maximaltemperatur im Boden gesenkt. Zusätzlich wird direkt über der GIL je nach Bedarf *thermisch stabilisierte Rückfüllung*<sup>5</sup> eingebracht. Für diese Materialien wird jeweils von einer konstanten thermischen Leitfähigkeit ausgegangen ( $\lambda_{\text{Fluessigboden}} = 2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ;  $\lambda_{\text{Backfill}} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ).

Als Randbedingungen werden entlang der Mitte des Modells eine Spiegelachse und für die Begrenzung des Simulationsraums im Boden ein Gebiet *infiniter Elemente* gewählt (vgl. Abbildung 4.5). Hierdurch wird die Simulationsumgebung virtuell unendlich groß, wodurch keine Beeinflussung durch ein zu klein gewähltes Simulationsgebiet auftritt. Weiterhin wird der Wärmeübergang an der Erdoberfläche durch Annäherungsformeln abgebildet, welche die Wärmeübertragung durch Strahlung und Konvektion an trockene Luft bei 20 °C berücksichtigen.

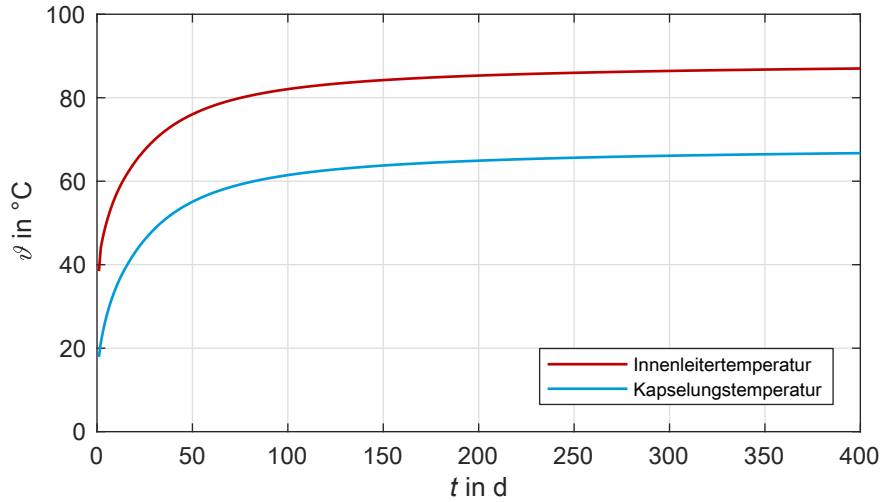
Die Verlustleistung wird nur im Innenleiter umgesetzt, da es sich um eine DC-GIL handelt. Bei dem verwendeten Leiterquerschnitt wird von einem Verlustleistungsbelag von 100 W/m ausgegangen. Dies ist realistisch für einen zu übertragenden Strom von 5 kA, wie er in aktuellen Projekten angestrebt wird [Ten2016].

Der zeitliche Verlauf der Temperaturen von Innenleiter und Kapselung ist in Abbildung 4.6 zusammengefasst. Nach einem Simulationszeitraum von 400 Tagen hat sich ein weitestgehend stationärer Zustand eingestellt. Durch die Wärmekapazität des Bodens ist die Dauer zum Erreichen des stationären Zustands hier deutlich länger als im Referenzmodell. Die Temperaturen von Innenleiter und Kapselung liegen mit etwa 87 °C respektive 67 °C vergleichsweise hoch (vgl. [Ten2016]). Gleichzeitig liegen die Werte noch nicht in einem unrealistischen Bereich. Die gewählten Parameter erscheinen damit geeignet, einen realitätsnahen Worst-Case nachzubilden, und werden daher beibehalten. Bestünde die Gefahr, dass durch sehr ungeeignete Bodenverhältnisse höhere Temperaturen erreicht werden, würde aller Wahrscheinlichkeit nach bei der Verlegung eine aufwendigere Aufarbeitung des Bodens gewählt.

Die auf diese Weise ermittelte Temperaturdifferenz von 20 K zwischen Innenleiter und Kapselung liegt im unteren Bereich dessen, was in der Literatur angegeben wird (vgl. Abschnitt 4.1). Trotz dieses Zwischenergebnisses wird für die Simulation der elektrischen Feldverteilungen (vgl. Abschnitte 4.3 bis 4.5)

<sup>4</sup> So sind die Erhöhung der Feuchte durch Regen oder auch die weiteren Witterungsbedingungen, die im Mittel zu einer Verbesserung der thermischen Leitfähigkeit von Erdböden beitragen, bisher nicht in der Modellierung enthalten.

<sup>5</sup> Hierbei handelt es sich um wiederverwerteten Aushub, dem Zusatzstoffe beigemischt werden um die thermische Leitfähigkeit zu erhöhen oder ihn weniger anfällig für Austrocknung zu machen.



**Abbildung 4.6.:** Temperaturverläufe von Innenleiter und Kapselung des *äußeren Modells*, nach [Trau2017\*]

weiterhin eine Temperaturdifferenz von 30 K zugrunde gelegt, um das Worst-Case-Szenario aus dielektrischer Sicht abzubilden.

Um die Ergebnisse des Umgebungsmodells für die Berechnung des 3D-Modells der GIL inklusive Isolator nutzbar zu machen, wird die Fähigkeit der Wärmeübertragung der Umgebung der GIL durch einen Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  zusammengefasst. Hierzu wird der gesamte durch die Oberfläche der Kapselung tretende Wärmestrom  $\dot{Q}$  auf die Temperaturdifferenz von Kapselungstemperatur  $\vartheta_{\text{Kapselung}}$  und Lufttemperatur  $\vartheta_{\text{Luft}}$  bezogen, vgl. Gleichung 4.1. Die Kapselungstemperatur wird über den Umfang konstant angenommen und zwischen 10 °C und 100 °C variiert. Die Lufttemperatur wird konstant zu 20 °C gesetzt. Dies stellt eine konservative Vereinfachung gegenüber der Betrachtung von Tages- und Jahresgängen der Lufttemperatur dar.

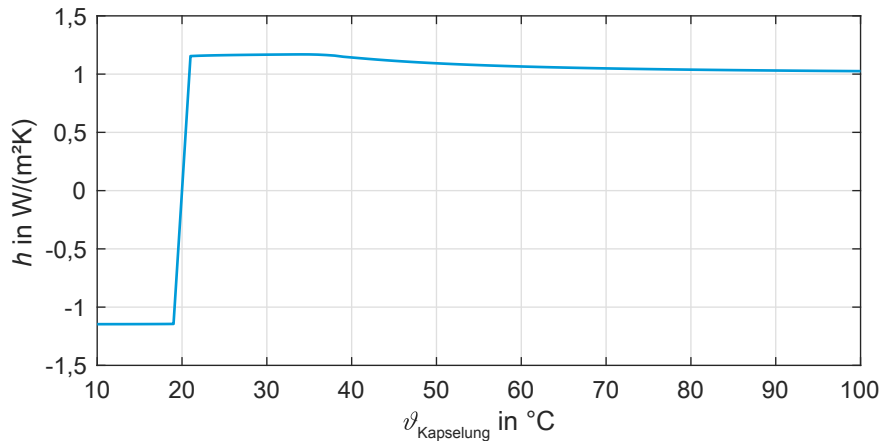
$$h = \frac{\dot{Q}}{A \cdot (\vartheta_{\text{Kapselung}} - \vartheta_{\text{Luft}})} \quad (4.1)$$

A: Oberfläche der Kapselung (in m<sup>2</sup>)

Der sich ergebende Wärmeübergangskoeffizient  $h$  ist in Abbildung 4.7 als Funktion der Kapselungstemperatur dargestellt. Dieser kann direkt als Randbedingung an das *innere Modell* übergeben werden. Der sinkende Verlauf ab etwa 35 °C lässt sich durch die beginnende Austrocknung des Bodens bei dieser Temperatur erklären.

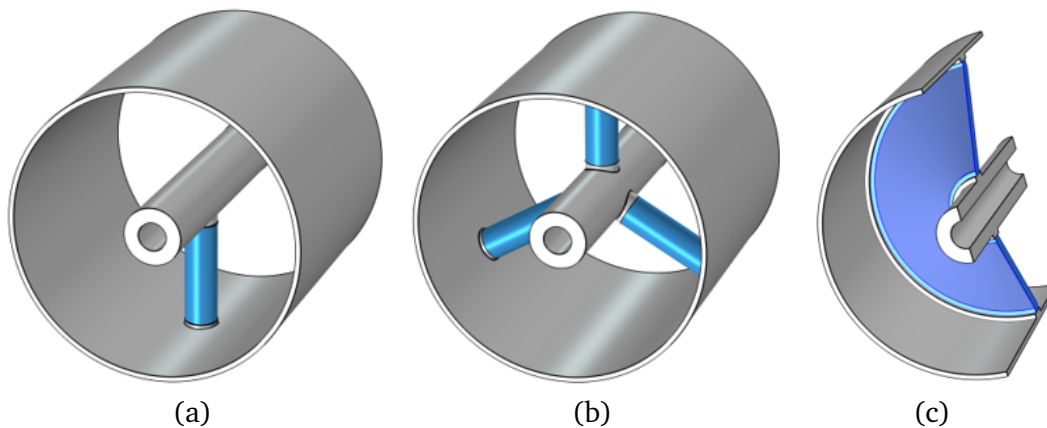
### Modellierung des Isoliersystems und Ergebnisse

Das Isoliersystem der GIL wird dreidimensional modelliert (*Innere Modell*). Dabei werden zwei Varianten untersucht: ein einzelner Stützisolator sowie die realitätsnahe sternförmige Anordnung von drei Stützisolatoren (vgl. Abbildung 4.8 (a) und (b)). Das Modell des einzelnen Stützers erlaubt die Untersuchung des Einflusses der Isolatorposition (in Abhängigkeit des Einbauwinkels). Zudem lassen sich die beiden Isoliersysteme vergleichen, um einen Hinweis auf die Abhängigkeit der Eigenerwärmung



**Abbildung 4.7.:** Wärmeübergangskoeffizient zwischen Außenleiter und Umgebungsluft ( $\vartheta_{\text{Luft}} = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ) in Abhängigkeit der Außenleitertemperatur, nach [Trau2017\*]

vom Volumen des eingesetzten Feldsteuermaterials zu erhalten. Die Geometrie des Isoliersystems wird stark vereinfacht, da das Ziel der Untersuchungen hier noch nicht die detaillierte Untersuchung der elektrischen Feldverteilung ist. Die Isolatoren werden als einfache Zylinder ( $l_{\text{Iso}} = 22\text{ cm}$ ;  $r_{\text{Iso}} = 3, 5\text{ cm}$ ) modelliert und schließen bündig an Verbindungsstücke zur Kapselung an. Es werden keine eingelassenen oder sonstigen Elektroden vorgesehen. Ein Modell eines Schottisolators, wie in Abbildung 4.8 (c) gezeigt, konnte nicht simuliert werden. Dieses weist eine zu große Grenzfläche zwischen Isolator und Gasraum auf, an der die Vernetzung des Modells besonders fein ausfallen muss. Der Arbeitsspeicherbedarf war daher in diesem Fall unverhältnismäßig hoch.



**Abbildung 4.8.:** Varianten des inneren Modells (a) einzelner Stützisolator, (b) drei Stützisolatoren in Sternbauweise, (c) Schottisolator (nicht simuliert), alle [Trau2017\*]

Für die Simulation werden in COMSOL Multiphysics® die Physik-Module *Wärmetransport*, *Fluiddynamik* und *Elektrisches Strömungsfeld* voll gekoppelt betrachtet. Hierdurch geht die Eigenerwärmung des Isolators wiederum als Wärmequelle in die Betrachtung des Wärmetransports mit ein und wird auch bei der Berechnung der Fluidströmung berücksichtigt. Die Grenze des Modells stellt in diesem Fall der äußere Rand der Kapselung dar, auf dem die Wärmeabgabe an die Umgebung vereinfacht mittels des im vorangegangenen Absatzes eingeführten Wärmeübergangskoeffizienten modelliert wird.

Das Ziel der Untersuchungen ist herauszufinden, bis zu welcher spezifischen elektrischen Leitfähigkeit kein thermisches Weglaufen oder ein Überschreiten einer Grenztemperatur im Isoliersystem auftritt. Hierzu werden transiente Simulationen durchgeführt, um die thermische Stabilität beurteilen zu können. Als Grenztemperatur (maximale Temperatur im Isolatorvolumen) werden 105 °C festgelegt (vergleiche [Koc2012]), was einer Sicherheitsmarge von 10 bis 20 K zur Glasübergangstemperatur<sup>6</sup> von üblicherweise eingesetzten Epoxidharzen entspricht.

Anschließend wird die vereinfachte Variante des inneren Modells aufgebaut. Bei dieser wird der konvektive Wärmeübergang im Isoliergas auf Basis der empirischen Gleichungen aus dem VDI-Wärmeatlas berechnet [VDI2013]. Beim Vergleich der Ergebnisse der beiden Modelle wird festgestellt, dass sich über eine Vielzahl an Simulationen im Bereich um die kritische spezifische elektrische Leitfähigkeit sehr vergleichbare Resultate ergeben. So liegt die maximale Abweichung der durch das vereinfachte Modell ermittelten zulässigen spezifischen Leitfähigkeit bei 15 %, der mittlere Fehler bei etwa 7 %. In Anbetracht der Tatsache, dass die gesuchte Größe immer mit einer beträchtlichen Sicherheitsmarge eingesetzt werden wird, wird dies als ausreichend genau erachtet und aufgrund der Zeitersparnis der Großteil der Simulationen am vereinfachten Modell durchgeführt.

Im Modell mit nur einem Stützisolator wird die Grenztemperatur erreicht, wenn sich eine durchschnittliche spezifische Leitfähigkeit im Isolatorvolumen von  $3 \cdot 10^{-9}$  S/m einstellt. Die durchschnittliche Temperatur im Isolatorvolumen beträgt dabei 95,6 °C, und es wird eine mittlere spezifische Verlustleistungsdichte von 7680 W/m<sup>3</sup> erreicht. Bezogen auf einen Isolator entspricht dies einer Leistung von 6,5 W. Im Fall der sternförmigen Anordnung dreier Stützisolatoren wird die Grenztemperatur erreicht, wenn die durchschnittliche spezifische Leitfähigkeit etwa  $1,5 \cdot 10^{-9}$  S/m beträgt (bei einer durchschnittlichen Isolatortemperatur von 93,5 °C, einer Verlustleistungsdichte von 3757 W/m<sup>3</sup> und damit etwa 3,2 W je Isolator).

Das Isolatorvolumen geht damit in die zulässige spezifische Leitfähigkeit ein. Dies liegt darin begründet, dass durch einen höheren lokalen Verlustleistungsumsatz mehr Wärme über die Umgebung abgeführt werden muss, was lokal die Kapselungstemperatur erhöht. Der Einfluss des Volumens auf die zulässige spezifische Leitfähigkeit ist allerdings unterproportional. Da der Schottisolator nur ein etwa drei mal größeres Volumen gegenüber dem Isoliersystem mit sternförmiger Anordnung aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die hier ermittelte zulässige spezifische Leitfähigkeit unter Einbezug einer Sicherheitsmarge auch für diesen anwendbar ist.

Da die Leitfähigkeit von Feldsteuermaterialien von vielen Faktoren abhängig ist (vgl. Kapitel 6) und ein Überschreiten der zulässigen spezifischen Leitfähigkeit als fatal einzustufen wäre, wird an dieser Stelle eine Sicherheitsmarge von Faktor 15 gewählt. Dies bedeutet, dass die über das Isolatorvolumen gemittelte spezifische elektrische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke und -temperatur einen Wert von  $1 \cdot 10^{-10}$  S/m nicht überschreiten sollte. Die mit diesem Wert durchgeführten Simulationen zeigten eine maximale Isolatortemperatur von 93 °C. Da die realen Verlegebedingungen mit höchster Wahrscheinlichkeit besser ausfallen als der hier angenommene Worst-Case, dürften die im Betrieb einer realen Anlage erreichten Temperaturen noch deutlich unter diesem Wert liegen. Damit wird  $\kappa_{N,\max} = 10^{-10}$  S/m als obere Grenze der zulässigen spezifischen Leitfähigkeit im Dauerbetrieb festgelegt.

<sup>6</sup> Als Glasübergangstemperatur wird die Temperatur bezeichnet, bei der die mechanische Festigkeit, beispielsweise von Polymeren, signifikant abnimmt. Diese darf im Betrieb daher nicht erreicht werden, um eine Verformung der Stützer zu verhindern. Oft ändern sich bei dieser Temperatur auch die elektrischen Eigenschaften eines Materials.



---

### 4.3 Strategie 1: Einsatz stark nichtlinearer Feldsteuermaterialien

---

Am Beispiel des Modells eines Schottisolators für gasisolierte Gleichspannungsleitungen (vgl. Abbildung 2.1), das bereits in Abschnitt 2.1.1 vorgestellt wurde, soll im Folgenden ein Feldsteuermaterial ausgelegt werden, dessen Anwendung zu einer deutlichen Reduktion der auftretenden Maximalfeldstärken entlang der Isolatoroberfläche führt. Hierzu soll die in Abschnitt 2.3.3 vorgestellte Strategie der Feldsteuerung über den gesamten Betriebsbereich genutzt werden. Das Ziel ist die Ermittlung der zulässigen (elektrischen) Parameter eines möglichen, stark nichtlinearen Feldsteuermaterials. Die Auslegung wird anschließend mittels Feldsimulationen auf ihre Nutzbarkeit geprüft und weitere Parameter abgeleitet. Abschließend werden die Ergebnisse in einem Anforderungskatalog bezüglich der elektrischen Eigenschaften eines nichtlinearen Feldsteuermaterials zusammengefasst.

---

#### 4.3.1 Auslegung und resultierende Feldverteilung

---

Die wichtigsten Anforderungen an die elektrischen Parameter können in der Kennliniendarstellung nach Abbildung 4.9 zusammengefasst werden (vgl. auch die Abschnitte 2.3.2 und 2.3.3). Nach der Literatur ist ein Material wirksam, dessen Kennlinie innerhalb des blau markierten Bereichs liegt [Chr2010]. Allerdings können sich – je nach Lage der Kennlinie – Unterschiede in der Wirksamkeit ergeben, die später diskutiert werden.

Dass die Geometrie des Simulationsmodells von kommerziell verfolgten Konzepten stellenweise abweicht, wird durch Sicherheitsmargen bei den erwarteten Feldstärken berücksichtigt. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass gerade empfindliche Größen, wie die Schaltfeldstärke, bei deutlichen Abweichungen der Geometrie Beachtung finden müssen.

#### Schaltfeldstärke $E_1$

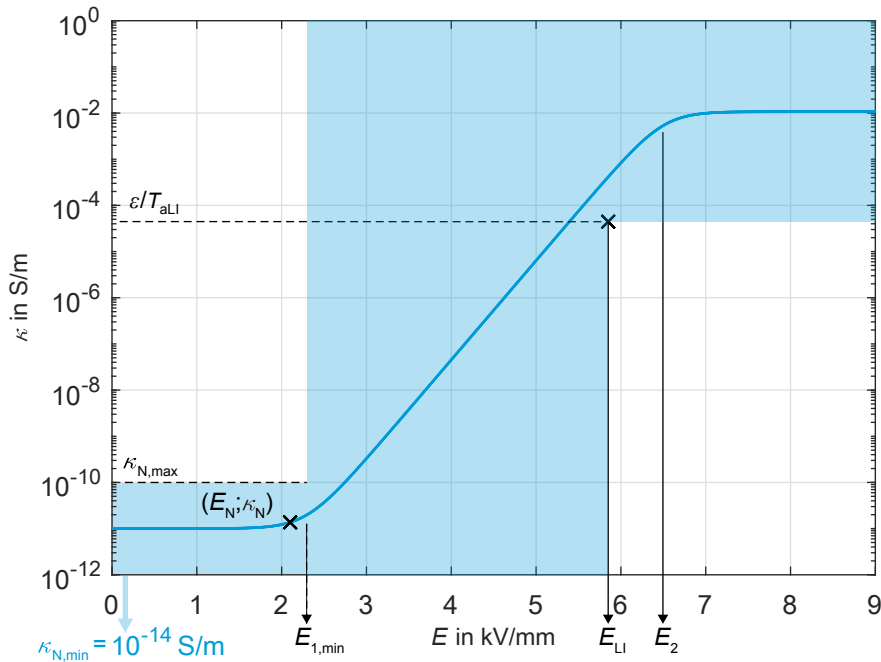
Der erste und kritischste Parameter bei der Auslegung eines nichtlinearen Feldsteuermaterials ist die *untere Grenze der Schaltfeldstärke*. Diese muss über der auf das Volumen des Isolators bezogenen mittleren Betriebsfeldstärke  $E_N$  liegen. Es muss nicht zwangsweise die höchste im System auftretende Feldstärke betrachtet werden, wie sie etwa an einer eingelassenen Elektrode auftreten könnte, da eine lokale Feldsteuerung in gewissen Maße zugelassen werden kann. Als erster Ansatz kann die zulässige Betriebsdauergleichspannung  $U_{rDC}$  (hier: 550 kV) auf die direkte Strecke durch den Isolator bezogen werden. Für das vorliegende Beispiel ergibt sich nach diesem Ansatz eine mittlere Betriebsfeldstärke  $E_N$  von 2,1 kV/mm. Bei Anwendung einer Sicherheitsmarge von 10 % wird als minimale Schaltfeldstärke  $E_{1,min} = 2,3$  kV/mm gewählt.

#### Zulässige spezifische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke

Weiterhin ist für einen risikolosen Einsatz des Feldsteuermaterials die Bestimmung des zulässigen Bereichs für die *spezifische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke* wichtig. Dieser Arbeitsschritt ist im vorangehenden Abschnitt detailliert erklärt. Die obere Grenze dieses Bereichs wird dadurch bestimmt, dass im Isoliersystem keine zu große Eigenerwärmung auftreten darf. Für das vorliegende Isoliersystem liegt diese Grenze bei  $\kappa_{N,max} = 10^{-10}$  S/m (über das Isolatorvolumen gemittelte spezifische Leitfähigkeit bei



Betriebsfeldstärke und -temperatur). Dieser Wert berücksichtigt bereits eine Sicherheitsmarge. Die untere Grenze ist weniger kritisch, sollte aber, um die Wirksamkeit des Feldsteuermaterials sicherzustellen, nicht zu gering gewählt werden. Sie wird in diesem Fall zu  $\kappa_{N,\min} = 10^{-14}$  S/m gesetzt. Für die erste Auslegung der Kennlinie nach Gleichung 2.6 wird für  $\kappa_0$  mit  $10^{-11}$  S/m ein Wert zwischen diesen Grenzen gewählt.



**Abbildung 4.9.:** Erste Auslegung einer  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie eines stark nichtlinearen Feldsteuermaterials für die Simulation, nach [Chr2010]

### Steigung $m$ der Kennlinie

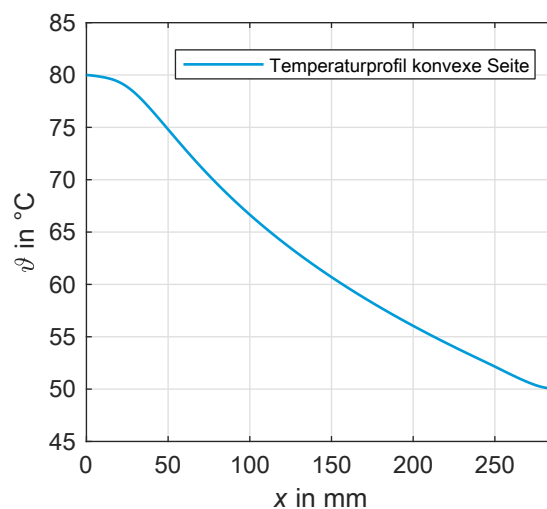
Die *Steigung der Kennlinie* im nichtlinearen Bereich ist nach dem derzeitigen Stand der Technik so zu wählen, dass die Bedingung des resistiven Strömungsfeldes (vgl. Gleichung 2.9) für die auslegungsrelevanten Fälle erfüllt ist [Chr2010]. Für die gasisierte Leitung sind die dielektrischen Belastungen durch Schaltüberspannungen als weniger kritisch anzusehen als die bei Blitzüberspannungen. Besonders hohe Belastungen ergeben sich, wenn die betrachtete GIL bereits über einen ausreichend langen Zeitraum unter voller Last betrieben wird, so dass sie thermisch und elektrisch als stationär angesehen werden kann, und anschließend eine Blitzüberspannung erfährt. Bei voller Auslastung wird hier von einer Temperaturdifferenz zwischen Innenleiter und Kapselung von  $\Delta\vartheta = 30$  K ausgegangen. Das Worst-Case-Szenario ergibt sich, wenn die Blitzstoßspannung mit der zur Betriebsspannung entgegengesetzten Polarität auftritt und daher der Effekt von angesammelten Ladungsträgern die Feldverteilung kritischer gestaltet. Im ersten Schritt wird die Auslegung der Nichtlinearität des Feldsteuermaterials nur für die Feldstärke bei Blitzstoßspannung ( $U_{LI} = 1550$  kV) durchgeführt. Auch hier kann mit der erwarteten, über das Isolatorvolumen gemittelten Feldstärke gerechnet werden, was  $E_{LI} = 5,85$  kV/mm ergibt. Typischerweise kann bei nichtlinearen Feldsteuermaterialien von einem  $\epsilon_r$  von etwa 10 ausgegangen werden (vgl. [Don2011]). Damit sollte das Feldsteuermaterial bei  $E_{LI}$  eine spezifische Leitfähigkeit von  $4,43 \cdot 10^{-5}$  S/m

überschreiten, um Gleichung 2.9 zu erfüllen (vgl. Abschnitt 2.3.3). Im Folgenden wird eine Sicherheitsmarge von Faktor zehn veranschlagt, woraus sich eine minimale Steigung von  $m = 2,15 \text{ mm/kV}$  ergibt. Die zulässige Leitfähigkeit bei  $E_{\text{LI}}$  wird durch das Energieaufnahmevermögen des Feldsteuermaterials begrenzt. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 4.3.2 genauer betrachtet. In diesem Abschnitt wird auch geprüft, ob der Energieumsatz während eines Schaltstoßspannungsimpulses kritisch ausfallen kann.

### Sättigungsfeldstärke $E_2$

Als erster Ansatz für die Forderung von  $E_2$  gilt, dass die Sättigungsfeldstärke über der mittleren Feldstärke im Isolatorvolumen im Moment des Blitzstoßspannungsscheitels liegt. So ist sichergestellt, dass sich für das gesamte Isolatorvolumen während der Dauer des Blitzstoßspannungsimpulses nur Arbeitspunkte im nichtlinearen Bereich der Kennlinie einstellen. Auf diese Weise wird der vergleichmäßigende Effekt des Feldsteuermaterials genutzt. Auf diese Forderung wird bei der Interpretation der Simulationsergebnisse noch weiter eingegangen. Für die Auslegung wird vorerst  $E_2 = 6,5 \text{ kV/mm}$  gesetzt.

Diese Anforderungen genügen, um eine erste Zielkennlinie mittels der Modellgleichung 2.6 zu erstellen. Hierbei wird der Einfachheit halber  $m_0 = 0 \text{ mm/kV}$  gesetzt. Damit wird ein Material abgebildet, das sich unterhalb der Schaltfeldstärke linear verhält. Die weiteren Ansprüche werden im Verlauf der Simulationen durch Parametervariationen ermittelt. Eine Kennlinie, die allen Bedingungen genügt, ist exemplarisch in Abbildung 4.9 dargestellt. Diese wird dem Simulationsprogramm COMSOL Multiphysics® übergeben, mit dessen Hilfe die Feldverteilungen für die wichtigsten Betriebspunkte und Fehlerszenarien berechnet werden. Die Simulationen werden an dem in Abbildung 2.1 gezeigten Modell des Schottisolators durchgeführt. Dieses Modell wurde gewählt, da der Rechenaufwand durch die Radialsymmetrie reduziert wird. Auch die Temperaturverteilung wird damit vereinfacht radialsymmetrisch für den Schottisolator vorgegeben. Das genutzte Temperaturprofil ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Wenn nicht anders angegeben, werden die Prüfparameter nach Tabelle 4.1 genutzt. Die Auswertung der Feldverläufe wird entlang der Gas-Feststoff-Grenzfläche der konvexen Seite des Schottisolators vorgenommen (vgl. **rot** markierte Auswertelinie in Abbildung 2.1).



**Abbildung 4.10.:** Für die Simulation genutztes vereinfachtes Temperaturprofil

## Ergebnisse der Simulation

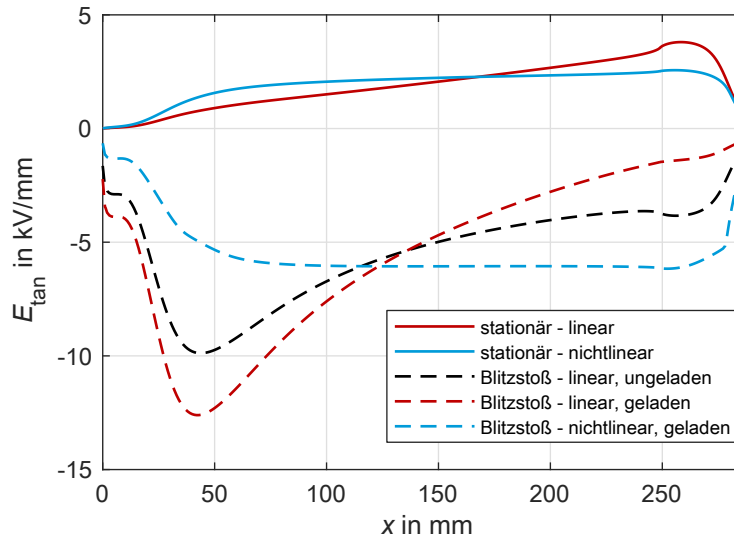
Nach der ersten Auslegung des stark nichtlinearen Feldsteuermaterials wird in Feldsimulationen geprüft, wie dieses die Feldverteilung im Vergleich zu einem herkömmlichen, linearen Isolierstoff beeinflusst (EP1, mit  $\kappa(20^\circ\text{C}) = 5,7 \cdot 10^{-16} \text{ S/m}$  und  $W_a = 0,95 \text{ eV}$ , vgl. Abschnitt 6.1.1, Tabelle 6.3). Zuerst werden die Feldberechnungen für den stationären Betriebszustand vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der transienten Simulationen diskutiert.

Die Verteilungen der Tangentialfeldstärken für die wichtigsten simulierten Szenarien sind in Abbildung 4.11 zusammengefasst. Alle Ergebnisse der Simulationen, die für die zulässige Betriebsdauerspannung ermittelt wurden, sind durchgezogen markiert. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass sich ein stationärer Zustand einstellt, und daher die Gleichungen für das elektrische Strömungsfeld zugrunde gelegt.

Bei Nutzung eines linearen Isolierstoffes, dessen spezifische Leitfähigkeit nur von der Temperatur abhängt, stellt sich die in Abbildung 4.11 **rot** (durchgezogen) markierte Feldverteilung ein. Die Temperaturabhängigkeit wird durch ein Vant’Hoffsches Gesetz mit einer Aktivierungsenergie von  $W_a = 0,95 \text{ eV}$  abgeschätzt<sup>7</sup>. Dabei wird eine Temperaturdifferenz von 30 K angenommen (vgl. Abbildung 4.10). Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 gezeigt, stellt sich eine Feldinversion ein, d.h. die höchste Feldstärke tritt in der Nähe der Kapselung auf. Bei Einsatz des Feldsteuermaterials mit der Kennlinie aus Abbildung 4.9 (die Temperaturabhängigkeit wurde gleich der des Isolierstoffes gesetzt) stellt sich ein vergleichmäßiger Verlauf ein (**blau**, durchgezogen). Die Feldüberhöhung durch die Feldinversion führt zu einer örtlichen Steigerung der spezifischen Leitfähigkeit, die wiederum das Feld zurückdrängt. Im sich einstellenden Gleichgewichtszustand übersteigen die maximal auftretenden Feldstärken mit  $E_{\text{tan,max}} = 2,57 \text{ kV/mm}$  nur knapp die Schaltfeldstärke. Die durch das Feldsteuermaterial erzielte Reduktion der maximal auftretenden Feldstärke im Dauerbetrieb beträgt hier 36,2 %. Durch diesen Effekt steigt die durchschnittliche spezifische Leitfähigkeit im Material und erreicht  $1,93 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$ . An dieser Stelle wird die ursprüngliche Auslegung geprüft. Im vorliegenden Fall ist eine ausreichende Sicherheitsmarge eingeplant ( $\kappa_{\text{N,max}} = 10^{-10} \text{ S/m}$ , vgl. Abschnitt 4.2), und die Kennlinie muss nicht angepasst werden.

Die Simulation der Feldverteilungen bei Blitzstoßspannungsbeanspruchung werden transient durchgeführt und sowohl Verschiebungsströme als auch Leitungsströme berücksichtigt. Damit werden auch kapazitiv-resistive Mischfelder abgebildet. Im Folgenden wird das Ergebnis einer genormten Blitzstoßspannung mit einem Scheitelwert von 1550 kV ohne Gleichspannungsvorbelastung des Isolators den Ergebnissen mit Vorbelastung gegenübergestellt. Dabei wird vom Worst-Case-Szenario ausgegangen. Dies bedeutet, dass sich ein stationäres Strömungsfeld ausgebildet hat, der Isolator also vollständig aufgeladen ist. Die Blitzstoßspannung wird als gegenpolar zur Betriebsspannung angenommen und dieser überlagert. Für die transienten Simulationen muss die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit des Feldsteuermaterials nicht berücksichtigt werden. Dies liegt darin begründet, dass diese im Vergleich zur ausgeprägten Abhängigkeit von der Feldstärke nur eine untergeordnete Rolle spielt. Weiterhin geben Ergebnisse aus dem Bereich der Forschung an Metalloxidvaristoren der Ableitertechnik Hinweise darauf, dass die Temperaturabhängigkeit in den Bereichen 2 und 3 der Kennlinie weniger stark ausgeprägt ist und vom Heißleiter- ins Kaltleiterverhalten wechseln kann [Tuc2015]. Für die Simulation transienter Überspannungen wird die Temperaturabhängigkeit daher vernachlässigt.

<sup>7</sup> Dieser Wert wurde für das nicht-funktionell gefüllte Epoxidharz EP1 ermittelt (vgl. Abschnitt 6.1.1) und befindet sich im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte [Lut2011].



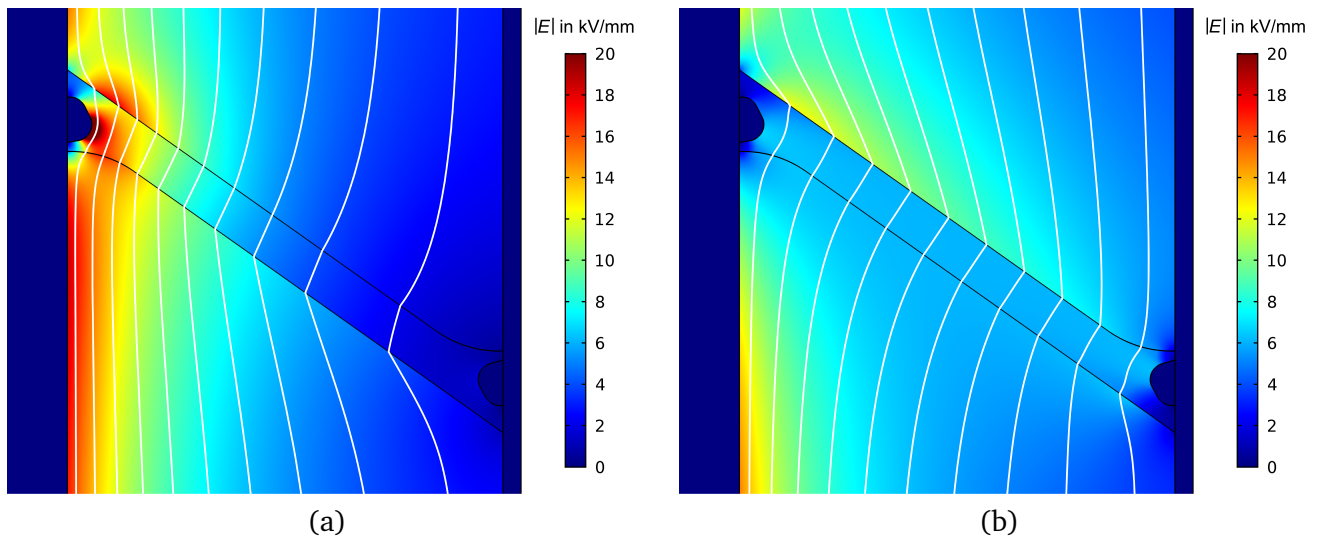
**Abbildung 4.11.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines Schottisolators,  $\Delta\vartheta = 30\text{ K}$ ;  $U_{\text{DC}} = 550\text{ kV}$ ;  $U_{\text{LI}} = -1550\text{ kV}$ ; nichtlineares FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.9 (schwarz: kapazitive Feldverteilung ohne Ladungsträgerakkumulation, rot: linearer Isolierstoff, blau: nichtlineares Feldsteuermaterial), nach [Her2017]

Die Ergebnisse der transienten Simulationen sind ebenfalls in Abbildung 4.11 zusammengefasst (strichlierte Kurven). Die Feldverteilung im Moment des Scheitelwerts der Blitzstoßspannung ohne Gleichspannungsvorbelastung ist für den linearen Isolierstoff in schwarz (strichliert) aufgetragen. Berücksichtigt man die Vorbelastung, und damit die Aufladung des Isolators, ergibt sich hingegen der in **rot** (strichliert) dargestellte Verlauf. In beiden Fällen tritt das Maximum der Tangentialfeldstärke in der Nähe des Innenleiters auf, da sich eine kapazitive Feldverteilung einstellt. Die akkumulierten Ladungsträger, die im stationären Betrieb zu einer Senkung der Feldstärke in der Nähe des Innenleiters führen, verursachen nun eine weitere Anhebung der Maximalfeldstärke (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Durch die Nutzung des nichtlinearen Feldsteuermaterials kann eine signifikante Reduktion der auftretenden Maximalfeldstärke um 50,9% erzielt werden (**blau**, strichliert). Dies ist auf zwei Effekte zurückzuführen: Zum einen übt das Material in diesem Betriebspunkt eine stark vergleichmäßigende Wirkung aus, da die Feldstärke fast im gesamten Isolatorvolumen oberhalb der Schaltfeldstärke liegt. Zum anderen stellt sich für die kurze Dauer des Spannungsimpulses eine deutlich erhöhte spezifische Leitfähigkeit ein, wodurch die akkumulierten Ladungsträger abtransportiert werden können und nicht als Quellen und Senken eines überlagerten Feldes bestehen. Daher unterscheiden sich die Ergebnisse eines vorgeladenen und eines nicht-vorgeladenen Isolators in diesem Fall nicht.

Die Reduktion der höchsten auftretenden Feldstärke ist nicht auf die Oberfläche des Isolators beschränkt. Abbildung 4.12 zeigt den Betrag der Feldstärke im Bereich um die Isolatoren. Es wird deutlich, dass durch den Einsatz des Feldsteuermaterials die höchsten auftretenden Feldstärken sowohl im Isolator selbst als auch im Gasraum um den Isolator und direkt um den Innenleiter deutlich gesenkt werden.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass auch durch eine Veränderung der Isolatorgeometrie eine Verbesserung der Verhältnisse in gewissem Rahmen möglich wäre. Hierdurch ließe sich allerdings kaum eine Optimierung über alle relevanten Betriebspunkte erreichen. Da die Feldverteilung stark durch die spezifische Leitfähigkeit des Isolierstoffs beeinflusst wird, die wiederum von der Temperaturverteilung



**Abbildung 4.12.:** Betrag der Feldstärke und Äquipotentiallinienverteilung des Isoliersystems mit konischem Schottisolator im Moment des Scheitels der Blitzstoßspannung, (a) linearer Isolierstoff EP1, (b) nichtlineares Feldsteuermaterial mit Kennlinie nach Abbildung 4.9

abhängt, ergeben sich mehrere Auslegungsszenarien, denen eine bestimmte Form nicht gleichzeitig gerecht werden kann.

In dieser vereinfachten Simulation wird sowohl von einer konstanten spezifischen Leitfähigkeit des umgebenden Isoliergases ausgegangen als auch die Leitfähigkeit entlang der Oberfläche nicht beachtet. Diese Vereinfachungen sind hinnehmbar, da hier von einem vergleichsweise leitfähigen Isolierstoff bzw. Feldsteuermaterial ausgegangen wurde. Trotzdem können sich je nach Außentemperatur, Gasfeuchte, Auslastung der GIL oder in Abhängigkeit des Vorhandenseins von Teilentladungen die Ladungsträgeransammlungen in anderer Form ausbilden (vgl. Abschnitt 2.1.5). Der Effekt des Ladungsträgerabtransports im Moment hoher Feldstärke bleibt unabhängig von diesen Faktoren erhalten und nivelliert die Effekte von Raum- und Flächenladungen im bzw. auf dem Isolator. Damit kann das Feldsteuermaterial dazu beitragen, die Robustheit des Isoliersystems gegen viele beeinflussende Faktoren zu erhöhen.

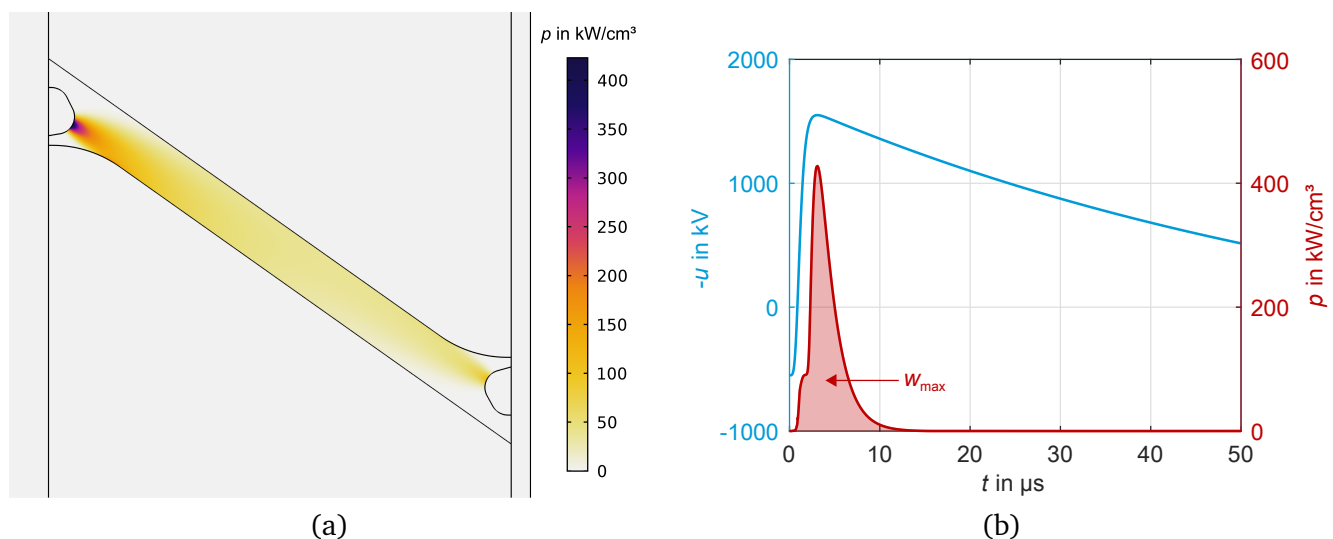
#### 4.3.2 Variation der Steigung $m$ der Kennlinie

Im vorigen Abschnitt wurde die Steigung der Kennlinie so gewählt, dass die Forderung nach dem Einstellen eines stationären Strömungsfeldes für eine genormte Blitzstoßspannung sicher erfüllt wurde. Dies ist für einen ersten Ansatz meist ausreichend. Insbesondere die Steigung  $m$  kann jedoch für reale Materialien nicht immer völlig frei eingestellt werden. Daher wird im Folgenden untersucht, welche Einflüsse eine Variation von  $m$  ausübt. Anhand der Ergebnisse wird das Bild des zulässigen Auslegungsspielraumes verfeinert. Von besonderem Interesse sind die drei Aspekte: *Energieumsatz im Feldsteuermaterial*, *Unterauslegung der Steigung* und *deutliche Überauslegung der Steigung*. Weiterhin werden im Rahmen dieser Betrachtungen auch die Rolle der spezifischen Sättigungsleitfähigkeit  $\kappa_{\text{sat}}$  beziehungsweise das Zusammenspiel von  $m$  und  $\kappa_{\text{sat}}$  beleuchtet.

## Energieumsatz im Feldsteuermaterial

Die während einer transienten Überspannung in Wärme umgesetzte Energie muss bei der Nutzung eines stark nichtlinearen Feldsteuermaterials beachtet werden. Hierbei handelt es sich um ein Kriterium, das bei der Betrachtung herkömmlicher Isolierstoffe keine Rolle spielt und daher bisher wenig Beachtung gefunden hat<sup>8</sup>. Aus der hohen geforderten spezifischen Leitfähigkeit im Moment des Scheitels der Blitzstoßspannung von  $\kappa(E_{LI}) = 4,43 \cdot 10^{-4} \text{ S/m}$  resultieren bei einer Feldstärke von  $E_{LI} = 5,85 \text{ kV/mm}$  Leistungsdichten von über  $400 \text{ kW/cm}^3$ . Dies verdeutlicht die Bedeutung dieser Untersuchung.

Erste Messungen (vgl. Abschnitt 6.2.2) geben Hinweise darauf, dass nicht die Leistung sondern die umgesetzte Energie das Kriterium ist, welches über einen Ausfall des Materials entscheidet (siehe auch [Cig2013] und [Cig2017]). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die spezifische Leitfähigkeit im Material nicht homogen ausfällt, sondern sich je nach Betriebspunkt mehr oder weniger verteilte, leitfähige Kanäle bilden<sup>9</sup>. Innerhalb der sehr kurzen Zeit des Impulses werden die leitfähigen Kanäle stark aufgeheizt und können die Wärme nur begrenzt an das umgebende Material abgeben. Kommt es zu einer zu starken lokalen Erwärmung, schmelzen die leitfähigen Kanäle oder rufen durch ihre Ausdehnung mechanische Spannungen hervor, welche zur Zerstörung des Materials führen. Bereits eine punktuelle Überlastung im Volumen des Isolators, die zu einer lokal begrenzten Zerstörung führt, würde genügen, um das gesamte Isoliersystem zum Versagen zu bringen. Daher wird im Folgenden die kritischste Stelle im System auf ihren spezifischen Energieumsatz hin überprüft.



**Abbildung 4.13.:** (a) Verteilung der Verlustleistungsdichte im Isolator im Moment des Spannungsscheitels einer genormten Blitzstoßspannung, (b) Verlauf der maximalen Verlustleistungsdichte und der (invertierten) Prüfspannung über der Zeit

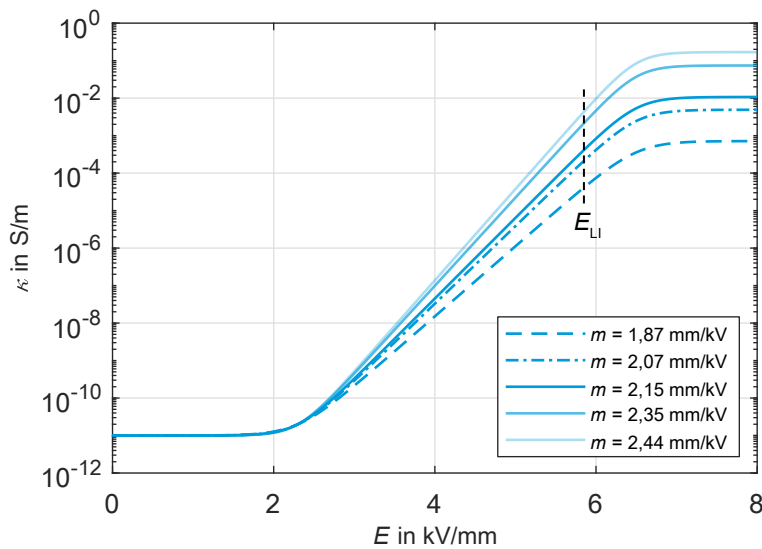
Ein weiteres Kriterium ist, dass der Isolator keinen zu hohen Temperatursprung erfahren darf, der ein thermisches Weglaufen des Isoliersystems initiieren kann. Da die Verteilung der Wärme innerhalb des Isolators als ausreichend schnell angesehen werden kann, um lokale Temperaturunterschiede auszugleichen, wird hier der Energieumsatz über das gesamte Isolatorvolumen betrachtet. Zusätzlich wird

<sup>8</sup> Ausnahmen finden sich in der frühen Literatur zu Mikrovaristoren, beispielsweise [Gre2004].

<sup>9</sup> Der Effekt wurde bei Varistoren der Ableitertechnik untersucht [Voj1997], [Jos2007]. Es ist davon auszugehen, dass sich dieses Erkenntnis auf Mikrovaristoren übertragen lässt.

auch der Temperatursprung an der am stärksten beanspruchten Stelle ermittelt. Hierdurch wird geprüft, ob die Gefahr besteht, dass die höchste zulässige Isolierstofftemperatur von 105 °C lokal überschritten wird. Um den Temperatursprung zu ermitteln, werden an realen Feldsteuermaterialien gemessene Wärmekapazitäten zugrunde gelegt.

Abbildung 4.13 (a) zeigt die Verteilung der Leistungsdichte im Moment des Scheitels der Blitzstoßspannung für das in Abschnitt 4.3 ausgelegte Material mit der in Abbildung 4.9 gezeigten Kennlinie. Der Leistungsumsatz fällt direkt vor der eingelassenen Elektrode am Innenleiter am höchsten aus. Der Verlauf der Verlustleistungsdichte an diesem Punkt ist in Abbildung 4.13 (b) über der Zeit dargestellt<sup>10</sup>. Es ist zu erkennen, dass der größte Teil der Energie in den ersten 10 µs umgesetzt wird. Die transienten Simulationen können daher auf 50 µs beschränkt werden, ohne dass ein relevanter Fehler in der Ermittlung der Energiedichte entsteht.



**Abbildung 4.14.:**  $\kappa$ - $E$ -Kennlinien von stark nichtlinearem Feldsteuermaterial bei Variation der Steigung  $m$

Um die zulässige spezifische Leitfähigkeit bei  $E_{Li}$  zu bestimmen, wird die Steigung  $m$  so variiert, dass sich die Kennlinien nach Tabelle 4.2 ergeben. Dabei wird  $E_2$  konstant bei 6,5 kV/mm gehalten. Die transiente Simulation wird mit jeder der so entstandenen Kennlinien (vgl. Abbildung 4.14) durchgeführt und die maximal im Isolator auftretende Leistungsdichte über der Simulationszeit von 50 µs integriert. Das Ergebnis dieser Berechnung ist der maximale volumenspezifische Energieumsatz  $w_{max}$  im Isolator. Dieser ist für jede untersuchte Kennlinie in Tabelle 4.2 angegeben. Weiterhin wird der erwartete Temperatursprung ausgewertet, der sich bei einer spezifischen Wärmekapazität von 1,75 J/(cm<sup>3</sup>K) ergibt. Dieser Wert wurde an mikrovaristorgefülltem Epoxidharz gemessen<sup>11</sup>. Um zu beurteilen, ob diese Variation der Kennlinie eine Auswirkung auf die Wirksamkeit der Feldsteuerung hat, wird die maximal auftretende Tangentialfeldstärke entlang der Auswertelinie in Abbildung 2.1 ebenfalls ermittelt.

Aus den in Tabelle 4.2 zusammengefassten Ergebnissen lässt sich schließen, dass die umgesetzte Energie, wie erwartet, direkt mit der Steigung der Kennlinie beziehungsweise der spezifischen Leit-

<sup>10</sup> Der Knick im Verlauf bei etwa 2 µs ist auf den Verschiebungsstrom durch den Isolator zurückzuführen. Da das Feldsteuermaterial im Bereich um die Elektrode höher beansprucht wird, wird es dort früher leitfähig. Durch den Verschiebungsstrom wird daher in diesem Bereich Wirkleistung umgesetzt.

<sup>11</sup> Für die Bereitstellung der Werte sei der Firma Merck gedankt.



**Tabelle 4.2.: Auswirkungen der Variation der Steigung  $m$  der Kennlinie**

$m$ (in mm/kV)	$\kappa(E_{LI})$ (in S/m)	Sicherheitsmarge der spez. Leitfähigkeit	$w_{\max}$ (in J/cm <sup>3</sup> )	$\Delta\vartheta_{\max}$ (in K)	$\Delta\vartheta_{\text{mean}}$ (in K)	$E_{\text{tan,max}}$ (in kV/mm)
1,87	$4,43 \cdot 10^{-5}$	1	0,18	0,1	$7,9 \cdot 10^{-3}$	6,29
2,07	$2,22 \cdot 10^{-4}$	5	0,72	0,4	$3,1 \cdot 10^{-2}$	6,17
2,15	$4,43 \cdot 10^{-4}$	10	1,37	0,8	$6,0 \cdot 10^{-2}$	6,17
2,35	$2,22 \cdot 10^{-3}$	50	7,52	4,3	0,32	6,17
2,44	$4,43 \cdot 10^{-3}$	100	15,86	9,0	0,67	6,16

fähigkeit bei  $E_{LI}$  zusammenhängt. Der Effekt der Feldsteuerung ist bereits ohne Sicherheitsmarge der spezifischen Leitfähigkeit bezüglich der Relaxationszeitkonstante (vgl. Abschnitt 2.3.3) sehr ausgeprägt, also bei  $\kappa(E_{LI}) = \varepsilon/T_{aLI}$ . Spätestens ab einer fünfmal höheren spezifischen Leitfähigkeit ist hier keine relevante Verbesserung mehr erzielbar (vgl.  $E_{\text{tan,max}}$  in Tabelle 4.2). Der über das gesamte Volumen gemittelte Temperatursprung ist für alle untersuchten Kennlinien  $< 1$  K, womit in diesem Fall ein thermisches Weglaufen nicht der kritischste Fall ist, der den Kennlinienspielraum eingrenzt. Der maximale, örtlich begrenzte Temperatursprung für  $m = 2,44$  mm/kV kann als grenzwertig angesehen werden. Bei einer maximalen Temperatur im Volumen des Isolators von  $100^\circ\text{C}$ , die in einem stabilen Dauerbetrieb auftreten und noch toleriert werden könnte, würde kurzzeitig die gesetzte Grenze von  $105^\circ\text{C}$  im Isolierstoff überschritten werden. Hier ist allerdings eine Sicherheitsmarge zur Glasübergangstemperatur üblicher Epoxidharze von 10 bis 20 K eingeplant.

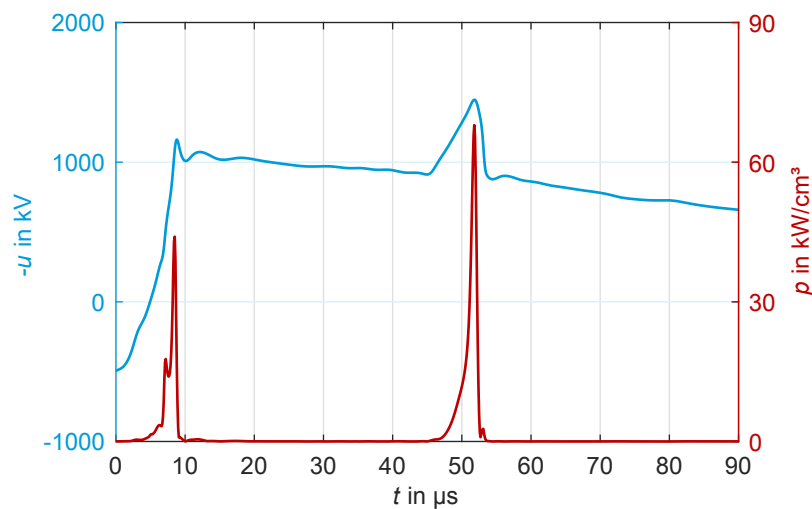
Die maximale spezifische Energiedichte von  $w_{\max} = 7,52 \text{ J/cm}^3$  bei  $m = 2,35$  mm/kV ist als kritisch einzustufen. Bisher gibt es wenig Untersuchungen zum Energieaufnahmevermögen von nichtlinearen Feldsteuermaterialien. Erste Ergebnisse an einem Mikrovaristorverbundstoff deuten darauf hin, dass dieser mit einer spezifischen Ausfallenergie von  $17,4 \text{ J/cm}^3$  deutlich weniger spezifische Energie umsetzen kann als Varistoren für die Ableitertechnik (vgl. Abschnitt 6.2.2). Dieser Wert entspricht in etwa der 50%-Ausfallenergie  $w_{\text{aus50}}$ . Die Auslegungsenergiedichte sollte drei bis fünf mal kleiner sein als  $w_{\text{aus50}}$ , um einen zuverlässigen Einsatz zu gewährleisten (vgl. [Cig2013]), und würde damit hier etwa  $w_{\text{design}} = 3,5 \dots 5 \text{ J/cm}^3$  betragen (vgl. Abschnitt 6.2.2). Es ist wahrscheinlich, dass die Ausfallenergie materialabhängig ist und durch die Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren erhöht werden kann. Für die hier durchgeführte Auslegung wird vorerst der vorliegende Wert als Grenzwert übernommen. Aus der Auslegungsenergiedichte von  $3,5 \text{ J/cm}^3$  ergibt sich eine zulässige spezifische Leitfähigkeit bei  $E_{LI}$  von etwa  $10^{-3} \text{ S/m}$ . Hieraus folgt allerdings nicht zwangsweise eine Forderung nach einer bestimmten Steigung  $m$ , wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

Sind Messwerte von realen Materialien vorhanden, kann auch die Geometrie angepasst werden, um den Einsatz zu ermöglichen. Die hier gezeigte Beispielgeometrie wurde noch nicht optimiert, um das Material bestmöglich zu nutzen. Durch den Einsatz einer flacheren Elektrode könnte das Feldsteuermaterial im Volumen vor der Elektrode entlastet und damit der maximale Energieumsatz gesenkt werden. Hierdurch kann auch ein Material mit höherem  $\kappa(E_{LI})$  genutzt werden, wenn keine Alternative vorhanden ist.

Neben der Blitzstoßspannung wird ebenfalls die Schaltstoßspannung Bestandteil der Prüfungen für ein Isoliersystem darstellen. Dies wirft die Frage auf, ob die Kombination aus geringerem Scheitel-



wert und längerer Anstiegs- und Rückenhalfwertszeit zu einem kritischen Energieumsatz führen kann. Daher wird für das vorliegende Modell auch der Fall einer genormten Schaltstoßspannung der Form 250/2500  $\mu\text{s}$  mit einem Scheitelwert von 1175 kV betrachtet. Für die Kennlinie aus Abbildung 4.9 mit  $m = 2,15 \text{ mm/kV}$  ergibt sich dabei eine maximale spezifische Energiedichte von  $w_{\text{max}} = 0,12 \text{ J/cm}^3$  (über einen Simulationszeitraum von 10 ms). Dies entspricht weniger als einem Zehntel der während des Blitzstoßspannungsimpulses umgesetzten Energie, womit die Schaltstoßspannung bei dieser Auslegung in Bezug auf den Energieumsatz eine unkritische Belastung darstellt. Dies lässt sich damit erklären, dass der geringere Scheitelwert der Spannung im stark nichtlinearen Feldsteuermaterial zu einer signifikant geringeren spezifischen Leitfähigkeit führt, was durch die größere Dauer des Impulses bei weitem nicht kompensiert wird.



**Abbildung 4.15.:** Verlauf der maximalen Verlustleistungsdichte im Isolator über der Zeit bei einem realitätsnahen Überspannungsverlauf nach [Gol2015] (Spannung invertiert; Länge der GIL: 10 km; Betrachtungsort bei 3,35 km)

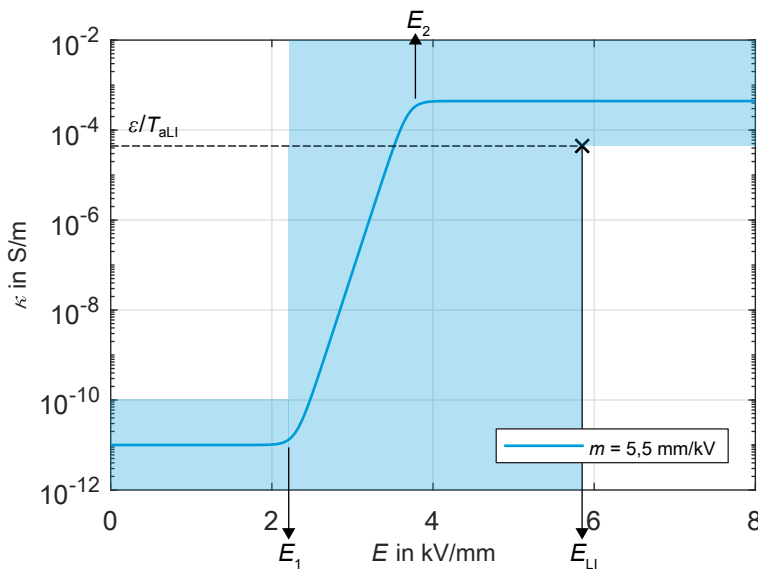
Abschließend wird geprüft, ob eine geänderte Form der Blitzstoßspannung einen starken Einfluss auf die umgesetzte Energie ausübt. Die genormte Blitzstoßspannung wurde entwickelt, um eine *dielektrisch* kritische, reproduzierbare Prüfsituation zu schaffen. Aus Sicht des Energieumsatzes ist aber beispielsweise die Steilheit der Spannungsfront weniger interessant. Hingegen wäre ein Plateau der Spannung auf hohem Niveau besonders kritisch. Es ist also davon auszugehen, dass ein realer Verlauf, wie er sich durch die Anwesenheit von Überspannungsableitern und Wanderwellenvorgängen einstellt, einen anderen Energieumsatz hervorruft. Um dies zu prüfen, wird der Literatur ein realitätsnaher Spannungsverlauf entnommen und der Simulationssoftware übergeben [Gol2015]. Wie in Abbildung 4.15 erkennbar ist, stellt sich zuerst ein geringerer Scheitelwert ein, gefolgt von einem flacheren Rücken als bei der genormten Blitzstoßspannung. Erst durch die Überlagerung mit der am Ende der GIL (Länge: 10 km) reflektierten Welle stellt sich an der beobachteten Stelle (bei 3,35 km) nach etwa 50  $\mu\text{s}$  ein Maximum von 1450 kV ein (vgl. Abbildung 4.15). Für das Feldsteuermaterial mit  $m = 2,15 \text{ mm/kV}$  ergibt sich ein  $w_{\text{max}}$  von  $0,15 \text{ J/cm}^3$ , was unter dem Ergebnis für die Simulation mit genormter Blitzstoßspannung liegt. Wie aus Abbildung 4.15 ersichtlich wird, ist der Energieumsatz durch den sehr kurz auftretenden Spannungsscheitel zeitlich noch begrenzter und damit für das Material weniger gefährlich. Dies bestätigt die

derzeitige Auslegung des Materials. Da die Ergebnisse in einer vergleichbaren Größenordnung liegen und die genormte Blitzstoßspannung die härtere Anforderung darstellt, ist deren Berücksichtigung ein guter erster Ansatz, um den Energieumsatz zu bewerten. Allerdings muss sichergestellt werden, beispielsweise durch den Einsatz von Überspannungsableitern, dass die real auftretenden Überspannungen 3 p.u. nicht überschreiten. In diesem Fall würde durch die starke Nichtlinearität der Energieumsatz überproportional steigen.

### Überauslegung der Steigung

Wie in Abschnitt 6.2.1 gezeigt wird, weisen einige Feldsteuermaterialien ein stärker ausgeprägtes nichtlineares Verhalten auf als in den vorangegangenen Abschnitten gefordert. Solche Materialien können trotzdem nutzbar sein, solange die Forderung nach der maximal zulässigen spezifischen Leitfähigkeit bei  $E_{LI}$  erfüllt und damit der Energieumsatz im Material in vertretbaren Grenzen gehalten wird. Gleichzeitig darf dabei die spezifische Sättigungsleitfähigkeit nicht kleiner als  $\varepsilon/T_{aLI}$  ausfallen, um die Ausbildung eines resistiven Strömungsfeldes zu ermöglichen (vgl. Gleichung 2.9).

Im folgenden Beispiel wird ein Feldsteuermaterial mit einer deutlich steileren Kennlinie als bisher angenommen genutzt:  $m = 5,5 \text{ mm/kV}$ ;  $E_1 = 2,3 \text{ kV/mm}$  und  $E_2 = 3,69 \text{ kV/mm}$  (vgl. Abbildung 4.16). Damit stellt sich eine spezifische Sättigungsleitfähigkeit von  $\kappa_{\text{sat}} = 4,43 \cdot 10^{-4} \text{ S/m}$  ein, identisch zu  $\kappa(E_{LI})$  bei der bisher betrachteten Kennlinie mit  $m = 2,15 \text{ mm/kV}$ .

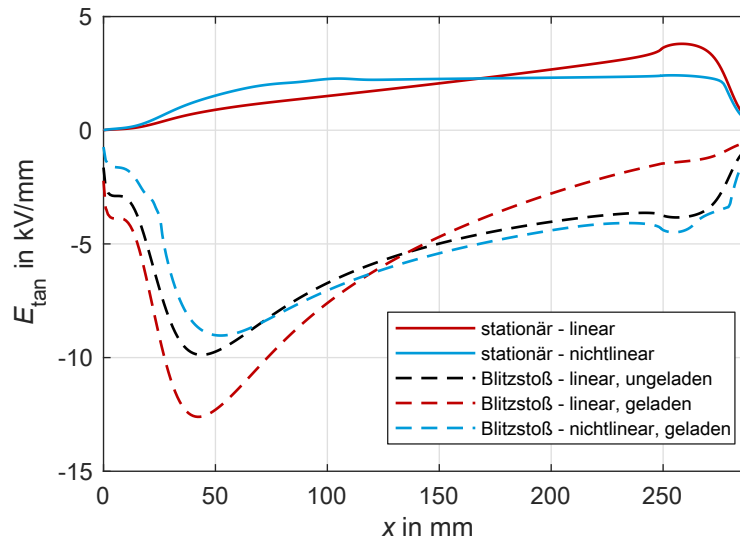


**Abbildung 4.16.:**  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie von nichtlinearem Feldsteuermaterial mit überausgelegter Steigung  $m = 5,5 \text{ mm/kV}$

Im Moment des Scheitels einer Blitzstoßspannung kommt es auch durch dieses Feldsteuermaterial zu einem ausreichend schnellen Abtransport der im Dauerbetrieb akkumulierten Ladungsträger, wodurch ebenfalls eine Reduktion der maximal auftretenden Tangentialfeldstärke erzielt wird. (vgl. Abbildung 4.17). Allerdings entfällt der Vorteil der Vergleichmäßigung der Feldverteilung, da sich für das Feldsteuermaterial ein Arbeitspunkt auf der Kennlinie außerhalb des nichtlinearen Bereichs einstellt. Die sich ergebende Maximalfeldstärke wird nur um 28 % gesenkt (im Vergleich zum Einsatz des elektrisch linearen Referenzisolierstoffs). Die erzielbare Verbesserung der Feldverteilung während des Blitzstoß-

spannungsimpulses fällt damit deutlich geringer aus als bei Nutzung eines speziell auf die Anwendung angepassten Feldsteuermaterials (Reduktion der Maximalfeldstärke um 50,9 %).

Hieraus lässt sich eine allgemeine Erkenntnis gewinnen: um effektiv hohe Feldstärken zu unterdrücken, muss ein nichtlineares Feldsteuermaterial auch im nichtlinearen Bereich seiner Kennlinie eingesetzt werden. Dies unterstreicht, wie wichtig die Kenntnis der Sättigungsfeldstärke ist.



**Abbildung 4.17.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines Schottisolators,  $\Delta\vartheta = 30^\circ$ ;  $U_{DC} = 550 \text{ kV}$ ;  $U_{LI} = -1550 \text{ kV}$ ; nichtlineares FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.16 (schwarz: kapazitive Feldverteilung ohne Ladungsträgerakkumulation, rot: linearer Isolierstoff, blau: nichtlineares Feldsteuermaterial)

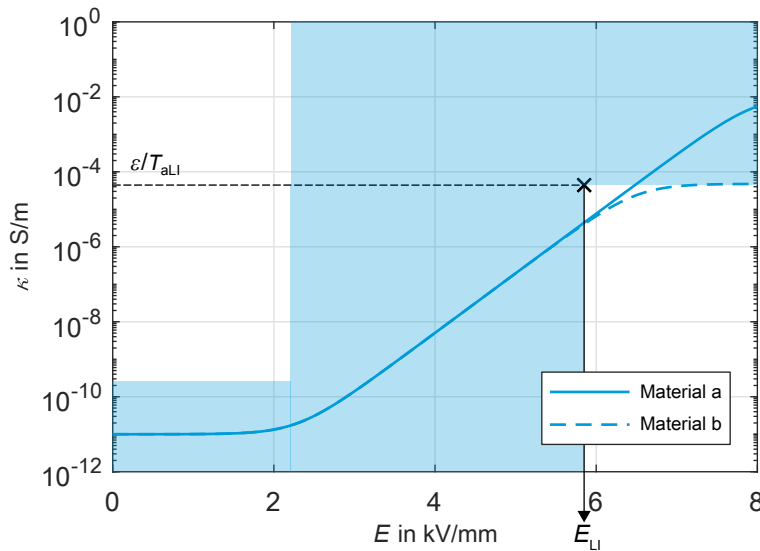
Mit einem  $w_{\max}$  von  $2,05 \text{ J/cm}^3$  wird über die Dauer einer genormten Blitzstoßspannung nur etwas mehr spezifische Energie umgesetzt als beim schwächer nichtlinearen Feldsteuermaterial ( $w_{\max} = 1,37 \text{ J/cm}^3$  bei  $m = 2,15 \text{ mm/kV}$ ), womit der Einsatz dieses Materials nicht ausgeschlossen wäre. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die gewünschte maximale Steilheit der Kennlinie (bei gegebenem  $E_1$ ) ausreichend niedrig sein sollte, um das Material bei  $E_{LI}$  in einem nichtlinearen Arbeitspunkt zu betreiben. Dies stellt allerdings eine Forderung mit geringerer Priorität dar (optionaler Auslegungsbereich in Abbildung 4.27).

### Unterauslegung der Steigung

Die ursprüngliche Forderung nach einer spezifischen Leitfähigkeit von  $\kappa(E_{LI}) > \varepsilon/T_{aLI}$ , bei der mittleren Feldstärke im Blitzstoßscheitel  $E_{LI}$ , muss nicht zwangsläufig erfüllt werden, um eine effektive Feldsteuerung zu ermöglichen. An den hochbeanspruchten Stellen des Isolators stellt sich in diesem Fall eine höhere Feldstärke ein, wodurch die spezifische Leitfähigkeit weiter gesteigert wird, bis die Bedingung nach Gleichung 2.9 erfüllt ist. Hierdurch wird lediglich der Arbeitspunkt auf der Kennlinie in Richtung höherer Feldstärken verschoben.

Zwei beispielhafte Kennlinien, für die sich eine Unterauslegung der spezifischen Leitfähigkeit  $\kappa(E_{LI})$  um einen Faktor von zehn ergibt, sind in Abbildung 4.18 gezeigt. Beide Kennlinien weisen eine Steigung von  $m = 1,59 \text{ mm/kV}$  auf, unterscheiden sich jedoch in der Sättigungsfeldstärke und damit auch in der sich ergebenden spezifischen Sättigungsleitfähigkeit. Das Material mit der Sättigungsfeldstärke

$E_2 = 8 \text{ kV/mm}$  wird im Folgenden als Material a bezeichnet, während bei Material b die Sättigungsfeldstärke  $E_2 = 6.5 \text{ kV/mm}$  beibehalten wurde. Beide Kennlinien werden analog zu Abschnitt 4.3.1 dem Simulationsprogramm übergeben und die Feldverteilung für den Dauerbetrieb sowie für die überlagerte Blitzstoßspannung berechnet. Die Ergebnisse der Simulationen mit beiden Kennlinien sind in Abbildung 4.19 zusammengefasst. Für den stationären Betrieb ergibt sich kein Unterschied zwischen den beiden Materialien, weshalb nur eine Kurve dargestellt ist.

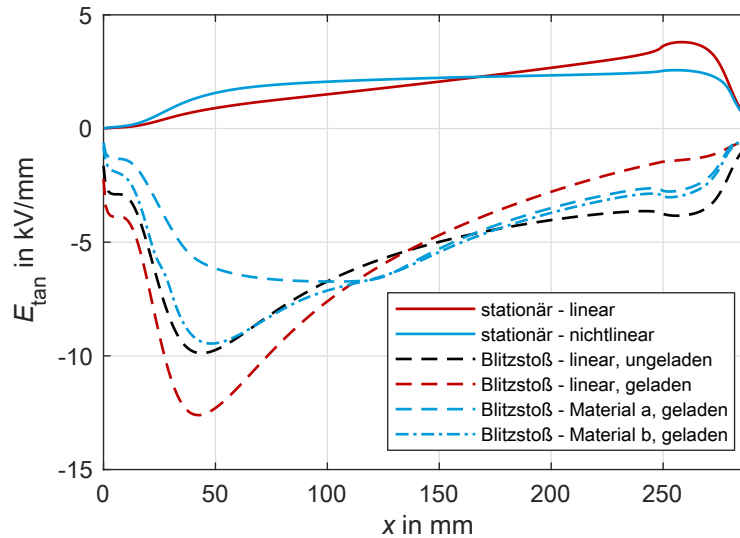


**Abbildung 4.18.:**  $\kappa$ - $E$ -Kennlinien von nichtlinearem Feldsteuermaterial mit unterausgelegter Steigung  $m = 1,59 \text{ mm/kV}$

Der maximale Betrag der Tangentialfeldstärke ergibt sich bei Nutzung von Material a bereits  $1,3 \mu\text{s}$  vor dem Erreichen des Spannungsscheitels. Durch die zu geringe spezifische Leitfähigkeit des Materials wird das elektrische Feld zu diesem Zeitpunkt teilweise kapazitiv bestimmt. Da die Spannungsänderungsgeschwindigkeit vor dem Erreichen des Scheitelpunktes abnimmt, kann sich rechtzeitig ein resistives Strömungsfeld einstellen, um eine effektive Feldsteuerung zu ermöglichen. Die maximale Tangentialfeldstärke ist mit  $6,73 \text{ kV/mm}$  noch immer um  $46,4\%$  geringer als bei einem linearen Isolierstoff.

Bei Nutzung von Material b zeigt sich eine weniger vorteilhafte Feldverteilung. Der höchste Betrag der Tangentialfeldstärke von  $9,46 \text{ kV/mm}$  wird  $0,8 \mu\text{s}$  vor dem Scheitelpunkt der Spannung erreicht. Damit konnte gegenüber einem linearen Isolierstoff nur noch eine Reduktion um  $24,6\%$  erzielt werden. Das Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass die spezifische Sättigungselektroleitfähigkeit  $\kappa_{\text{sat}} = 4,75 \cdot 10^{-5} \text{ S/m}$  beträgt und damit die Bedingung nach Gleichung 2.9 nicht mehr erfüllt werden kann. Hieraus lässt sich ableiten, dass die spezifische Sättigungselektroleitfähigkeit  $\kappa_{\text{sat}}$  größer als  $\epsilon/T_{\text{aLI}}$  sein sollte. Diese Bedingung gilt unabhängig von der Steigung der Kennlinie. Es ist jedoch festzuhalten, dass ein Feldsteuermaterial, dessen Kennlinie diese Forderung knapp untererfüllt, noch immer eine Verbesserung gegenüber einem linearen Isolierstoff darstellen kann.

Mit einem spezifischen Energieumsatz von  $w_{\text{max,a}} = 0,113 \text{ J/cm}^3$  respektive  $w_{\text{max,b}} = 0,079 \text{ J/cm}^3$  werden hier die bisher geringsten Energiedichten festgestellt. Das Ergebnis ist nachvollziehbar, da die erreichten spezifischen Leitfähigkeiten im Material vergleichsweise gering ausfallen. Die Nutzung eines



**Abbildung 4.19.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines Schottisolators,  $\Delta\vartheta = 30\text{ K}$ ;  $U_{\text{DC}} = 550\text{ kV}$ ;  $U_{\text{LI}} = -1550\text{ kV}$ ; nichtlineare FGMs mit Kennlinien nach Abbildung 4.18 (schwarz: kapazitive Feldverteilung ohne Ladungsträgerakkumulation, rot: linearer Isolierstoff, blau: nichtlineares Feldsteuermaterial), für die Blitzstoßspannung ist immer der Verlauf mit der höchsten auftretenden Maximalfeldstärke gezeigt, Material a:  $1,3\text{ }\mu\text{s}$  vor dem Scheitel, Material b:  $0,8\text{ }\mu\text{s}$  vor dem Scheitel

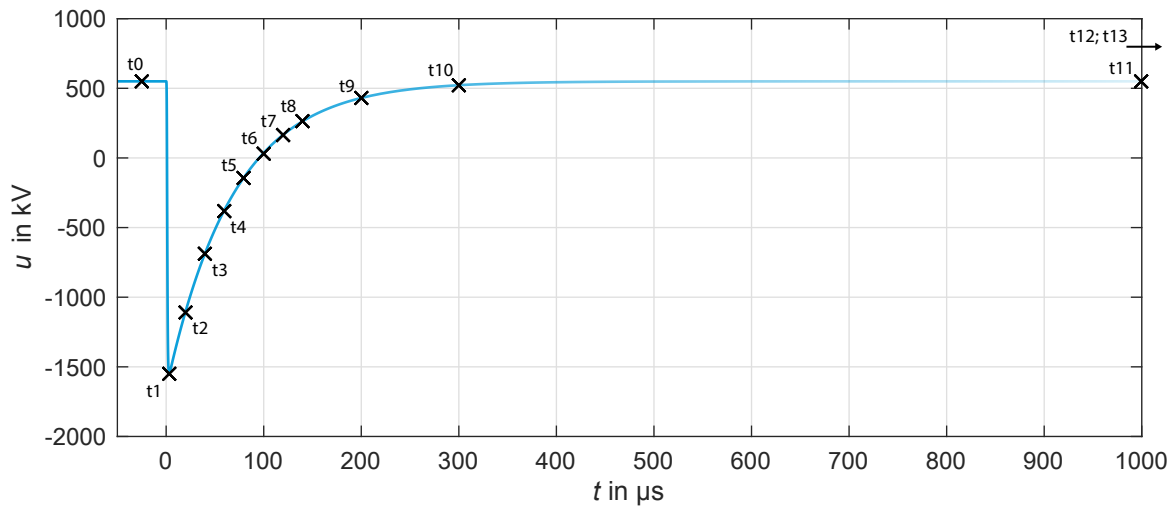
Feldsteuermaterials mit unterausgelegter Steigung  $m$  kann also ein Mittel darstellen, das Risiko der Zerstörung des Materials durch einen zu hohen spezifischen Energieeintrag zu reduzieren.

### 4.3.3 Felldrückstoß-Effekt

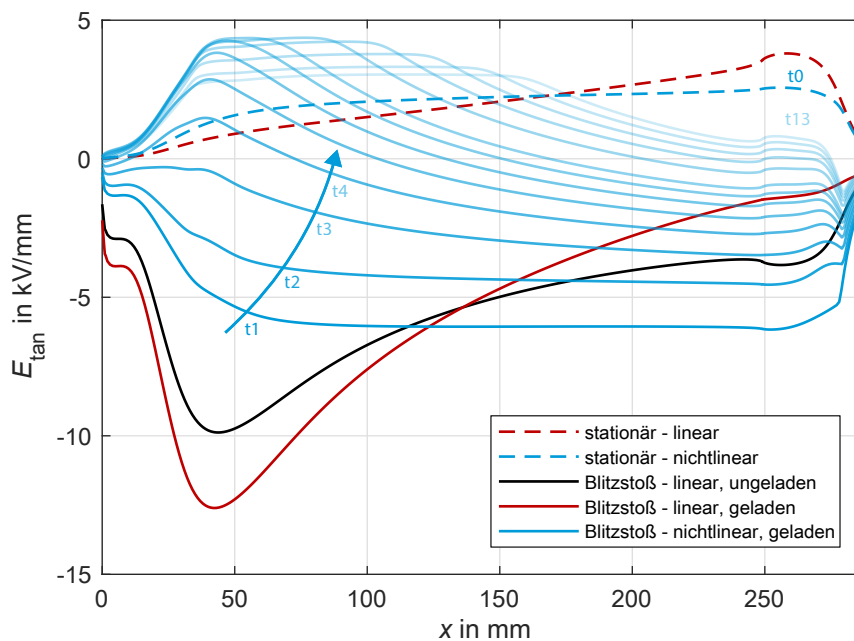
Bisher wurde der Simulationszeitraum für die transienten Simulationen der überlagerten Blitzstoßspannung auf die Rückenhalbwertszeit von  $50\text{ }\mu\text{s}$  beschränkt, um Rechenzeit zu sparen. Mittels stichpunktartiger Simulationen konnte bestätigt werden, dass sowohl das Maximum der Feldstärke als auch der Großteil des Energieumsatzes zu diesem Zeitpunkt bereits erreicht werden und der Simulationszeitraum damit ausreichend lang gewählt wurde. Allerdings kann bei einer Betrachtung über die Rückenhalbwertszeit hinaus ein weiterer Effekt beobachtet werden. Dieser wird mit dem Namen *Felldrückstoß-Effekt* bezeichnet und im Folgenden beschrieben. Für die gezeigte Simulation wird ein Feldsteuermaterial mit der Kennlinie nach Abbildung 4.9 zugrunde gelegt.

Bereits vor dem Erreichen des Nulldurchgangs der Spannung (siehe Zeitpunkt  $t_4$  in Abbildung 4.20), stellt sich eine bipolare Feldverteilung entlang des Isolators ein. Im Bereich nahe dem Innenleiter ergibt sich eine positive Tangentialfeldstärke, obwohl der Innenleiter gegenüber der Kapselung auf einem negativen Potential liegt. Zum Außenleiter hin stellt sich wieder eine negative Tangentialfeldstärke ein. Die Feldverteilungen für verschiedene Zeitpunkte sind in Abbildung 4.21 zusammengefasst, wodurch die zeitliche Entwicklung nachvollzogen werden kann.

Zum Zeitpunkt  $t_0$  (Dauerbetrieb,  $U = 550\text{ kV}$ ) hat sich ein stationäres Strömungsfeld ausgebildet. Im Scheitel der überlagerten Blitzstoßspannung ( $t_1$ ) vergleichmäßigst das Feldsteuermaterial die Feldverteilung, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Über die Zeitpunkte  $t_2$  und  $t_3$  reduziert sich die Feldstärke



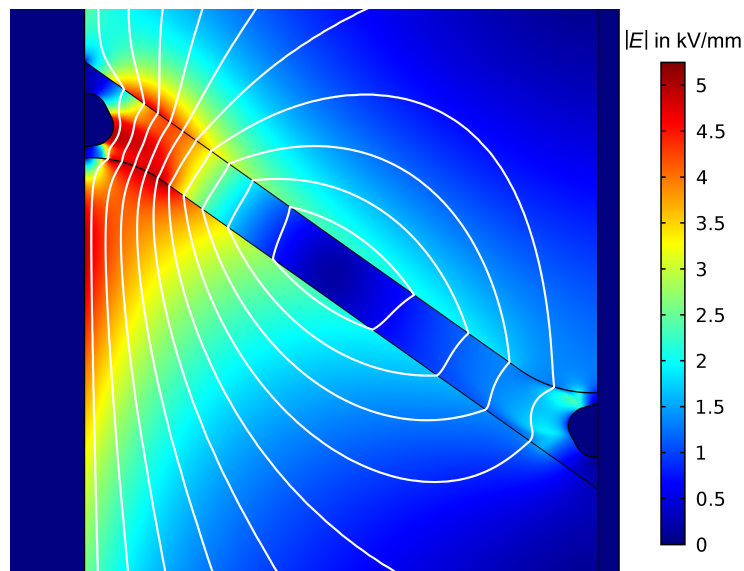
**Abbildung 4.20.:** Verlauf der überlagerten Blitzstoßspannung und zur Auswertung gewählte Zeitpunkte



**Abbildung 4.21.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines Schottisolators,  $\Delta\vartheta = 30^\circ$ ;  $U_{\text{DC}} = 550$  kV;  $U_{\text{LI}} = -1550$  kV; nichtlineares FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.9 (schwarz: kapazitive Feldverteilung ohne Ladungsträgerakkumulation, rot: linearer Isolierstoff, blau: nichtlineares Feldsteuermaterial für verschiedene Zeitpunkte  $t_0 \dots t_{13}$ )

entlang des gesamten Isolators, da der Absolutwert der Spannung abnimmt. Obwohl zum Zeitpunkt  $t_4$  noch eine negative Spannung über dem Isolator anliegt, stellt sich die bereits angesprochene bipolare Feldverteilung ein. Die höchsten Feldstärken, nach Durchlaufen des Blitzstoßscheitels, ergeben sich mit  $4,4 \text{ kV/mm}$  zwischen  $t_7$  und  $t_9$ , also nach 120 bis  $200 \mu\text{s}$ . Danach strebt die Feldverteilung langsam der stationären Verteilung zu, die aber nach 50 ms noch nicht erreicht wird ( $t_{13}$ ).

Ursache für diesen Effekt sind Ladungsträger, die im nichtlinearen Material akkumuliert werden und im Moment des Scheitels der Blitzstoßspannung für die Vergleichmäßigung der Feldverteilung sorgen. Da das Material beim Sinken der anliegenden Spannung überproportional schnell seine spezifische Leitfähigkeit verliert, können die Ladungsträger nicht ausreichend schnell verschoben werden und bilden als Quellen und Senken ein elektrisches Feld aus. Dieses wird dem durch die anliegende Spannung generierten überlagert. Verdeutlicht wird dies durch die Betrachtung des Feldbildes bei  $t_7$  (vgl. Abbildung 4.22), auf dem geschlossene Äquipotentiallinien in der Mitte des Isolators erkennbar sind.



**Abbildung 4.22.:** Betrag der Feldstärke und Äquipotentiallinienverteilung des Isoliersystems mit konischem Schottisolator zum Zeitpunkt  $t_7$ :  $t = 120 \mu\text{s}$  (nichtlineares FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.9)

Bei Nutzung eines neuen Materials empfiehlt es sich zu prüfen, in welchem Umfang der Feldrückstoß-Effekt auftreten kann. Zwar liegt die durch diesen Effekt verursachte Feldstärke unterhalb der (durch das Feldsteuermaterial bereits deutlich reduzierten) auftretenden Feldstärke im Moment des Spannungsscheitels, bleibt allerdings fast unverändert für etwa  $100 \mu\text{s}$  bestehen. In diesem Fall kann der Effekt als unkritisch eingestuft werden, da die Feldstärke während des Feldrückstoßes nur etwa 15,8 % über dem Wert liegt, der sich ohne Nutzung des Feldsteuermaterials im Dauerbetrieb einstellen würde. Der Effekt tritt bei allen hier untersuchten Varianten des stark nichtlinearen Feldsteuermaterials auf und ist von der Steigung  $m$  der Kennlinie abhängig. Bei geringerer Steigung ist der Effekt stärker ausgeprägt. Die höchste durch den Feldrückstoß-Effekt hervorgerufene Feldstärke wird bei Einsatz des Materials mit unterausgelegter Kennlinie (Material a:  $m = 1,59 \text{ mm/kV}$ ;  $E_2 = 8 \text{ kV/mm}$ ) mit  $5,1 \text{ kV/mm}$  erreicht. Dies entspricht einer Erhöhung um 34,2 % gegenüber der Feldstärke im Dauerbetrieb ohne Nutzung eines



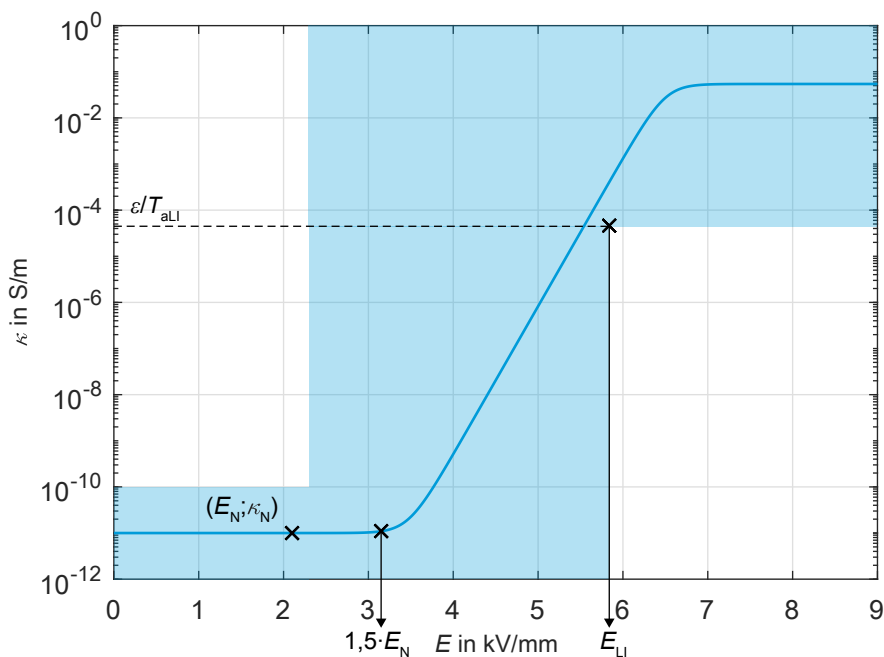
Feldsteuermaterials. Eine direkte Bedingung für den Anforderungskatalog (vgl. Abschnitt 4.3.5) geht aus dem hier betrachteten Effekt nicht hervor.

#### 4.3.4 Einfluss auf die Prüfung von Betriebsmitteln

Der Einsatz von stark nichtlinearen Feldsteuermaterialien in Isoliersystemen kann einen Einfluss auf die Prüfbarkeit der Betriebsmittel nehmen. Zum einen können länger anliegende Prüfspannungen zu einer thermischen Belastung des Betriebsmittels führen, zum anderen kann auch die Prüfung mit impulsförmigen Spannungen erschwert werden.

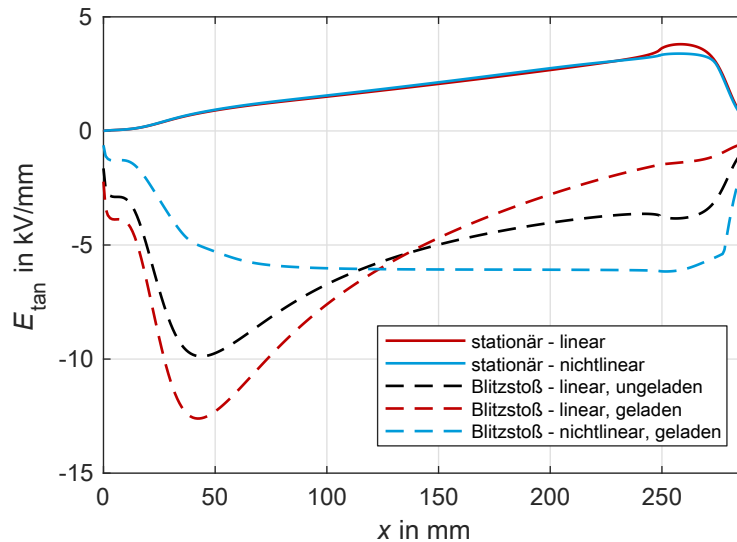
##### Stehspannungs- und Teilentladungsprüfung

Wird die Auslegung der Schaltfeldstärke  $E_1$  so wie bisher beschrieben vorgenommen, ist zu beachten, dass das Anlegen von Dauerprüfspannungen über der zulässigen Betriebsdauergleichspannung zu einer unzulässigen Eigenerwärmung des Systems führen kann. Derzeit wird in der Cigré-Arbeitsgruppe D1/B3.57 für die Teilentladungsprüfung eine Wechselspannung mit  $\hat{U} = 1,5 \cdot U_{\text{rDC}}$  zur Vorbelastung für eine Minute und die eigentliche Teilentladungsmessung mit  $\hat{U} = 1,2 \cdot U_{\text{rDC}}$ , ebenfalls für eine Minute, diskutiert [Cig2018]. Zwar liegt der arithmetische Mittelwert der Spannung damit nur 6 % über der Betriebsdauerspannung, allerdings wird durch die nichtlinearen Materialeigenschaften im Scheitel überproportional mehr Verlustleistung umgesetzt. Wird eine Teilentladungsprüfung mit Gleichspannung nachgelagert oder die Stehspannungsprüfung mit  $U_{\text{rwDC}} = 1,5 \cdot U_{\text{rDC}}$  durchgeführt, sind die Prüfbedingungen in dieser Hinsicht noch härter.



**Abbildung 4.23.:**  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie von nichtlinearem Feldsteuermaterial geeignet für eine Prüfspannung von  $1,5 \cdot U_{\text{rDC}}$  mit höherem Schaltpunkt  $E_1 = 3,47 \text{ kV/mm}$  und höherer Steigung  $m = 3,21 \text{ mm/kV}$

Um eine potentielle unzulässige Eigenerwärmung zu vermeiden, kann als Sicherheitsmaßnahme gefordert werden, dass die Schaltfeldstärke  $E_1$  größer sein muss als  $1,5 \cdot E_N$ . Eine Kennlinie, die diese Anforderung erfüllt, ist in Abbildung 4.23 dargestellt. Diese weist eine Steigung von  $m = 3,21 \text{ mm/kV}$  auf und würde ebenfalls eine effektive Feldsteuerung bei Blitzstoßspannungsbeanspruchung ermöglichen. Die Wirksamkeit im stationären Zustand wäre allerdings eingeschränkt, wie in Abbildung 4.24 erkennbar ist. Zudem wird durch die höhere Steigung  $m$  ein erhöhter spezifischer Energieumsatz von  $w_{\max} = 2,78 \text{ J/cm}^3$  während einer Blitzstoßspannung erzielt.



**Abbildung 4.24.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines Schottisolators,  $\Delta\vartheta = 30 \text{ K}$ ;  $U_{\text{DC}} = 550 \text{ kV}$ ;  $U_{\text{LI}} = -1550 \text{ kV}$ ; nichtlineares FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.23 (schwarz: kapazitive Feldverteilung ohne Ladungsträgerakkumulation, rot: linearer Isolierstoff, blau: nichtlineares Feldsteuermaterial mit höherem Schaltpunkt  $E_1 = 3,47 \text{ kV/mm}$  und höherer Steigung  $m = 3,21 \text{ mm/kV}$ )

Die Forderung nach einem Material mit derart hohem Schaltpunkt ist als anspruchsvoll einzuschätzen. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass gerade die Entwicklung von Materialien mit hohen Schaltfeldstärken eine große Herausforderung darstellt (vgl. Abschnitt 6.2.1). Wird ein technisch geeignetes Material gefunden, dessen Schaltfeldstärke unterhalb von  $1,5 \cdot E_N$  liegt, sollte geklärt werden, ob an der Prüfung in der derzeit vorgeschlagenen Form festgehalten werden muss. Alternativ ist es in Abhängigkeit der konkreten Materialeigenschaften denkbar, dass die kurze Prüfdauer aus thermischer Sicht noch tragbar ist. Dies könnte z.B. durch eine Erweiterung der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Simulation ermittelt werden.

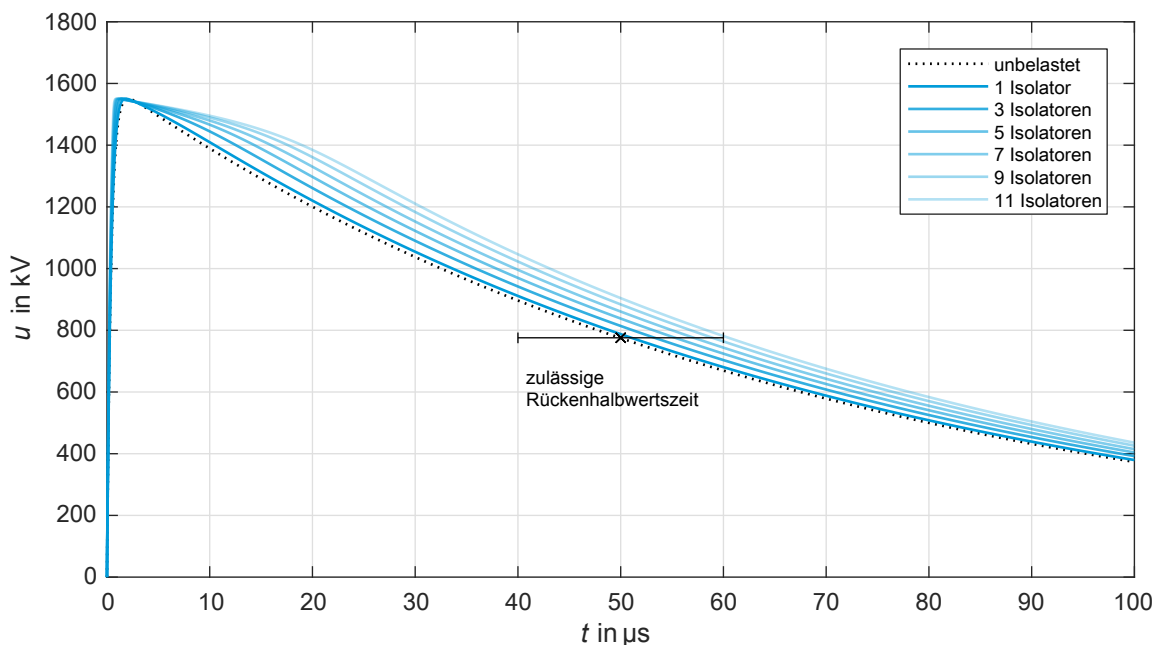
### Prüfung mit Blitzstoßspannung

Wie bereits in Abschnitt 4.1 beschrieben wurde, stellt die Prüfung mit überlagerter gegenpolarer Blitzstoßspannung nach Gleichspannungs-Vorbelastung bei aufgeheiztem Innenleiter die höchste Anforderung an ein Gleichspannungsisoliersystem. Diese Prüfung sollte daher unbedingt durchgeführt werden, unabhängig davon, ob es sich um ein herkömmliches oder um ein nichtlinear gesteuertes Isoliersystem handelt. Da die spezifische Leitfähigkeit des hier ausgelegten nichtlinearen Feldsteuermaterials bei  $E_{\text{LI}}$  Werte von bis zu  $4,43 \cdot 10^{-4} \text{ S/m}$  annehmen kann, würden durch einen daraus gefertigten Isolator im Scheitel der Blitzstoßspannung Ströme von über  $100 \text{ A}$  fließen. Hieraus ergibt sich eine für Stoßspan-

nungsgeneratoren ungewöhnliche Belastung. Im Folgenden soll untersucht werden, ob die Prüfung mit Blitzstoßspannung an derart nichtlinear gesteuerten Isoliersystemen mit einem Marx-Generator durchführbar ist.

Hierzu wird mittels des bereits vorgestellten Simulationsmodells die  $U$ - $R$ -Kennlinie für einen Schottisolator ermittelt und einem Schaltungssimulationsstool übergeben. Der Verlauf der Blitzstoßspannung wird nicht mehr fest eingepreist, sondern durch die Nachbildung eines Marx-Generators simuliert. Hierbei wird von einem Modell mit einer großen Stoßkapazität von  $C_S = 200 \text{ nF}$  ausgegangen (dies entspricht bei einer Summenladespannung von  $2 \text{ MV}$  einer Stoßenergie von  $400 \text{ kJ}$ ). Der Dämpfungswiderstand wird mit  $R_D = 186,3 \Omega$  groß genug gewählt, um bei einer geschätzten Kreisinduktivität von  $40 \mu\text{H}$  die Bedingung des aperiodischen Schwingkreises zu erfüllen. Mit einer Belastungskapazität von  $C_B = 2,2 \text{ nF}$  und einem Entladewiderstand von  $R_E = 338,7 \Omega$  ergibt sich für den unbelasteten Generator ein normgerechter Spannungsverlauf<sup>12</sup>, wie in Abbildung 4.25 dargestellt (schwarz, gepunktet).

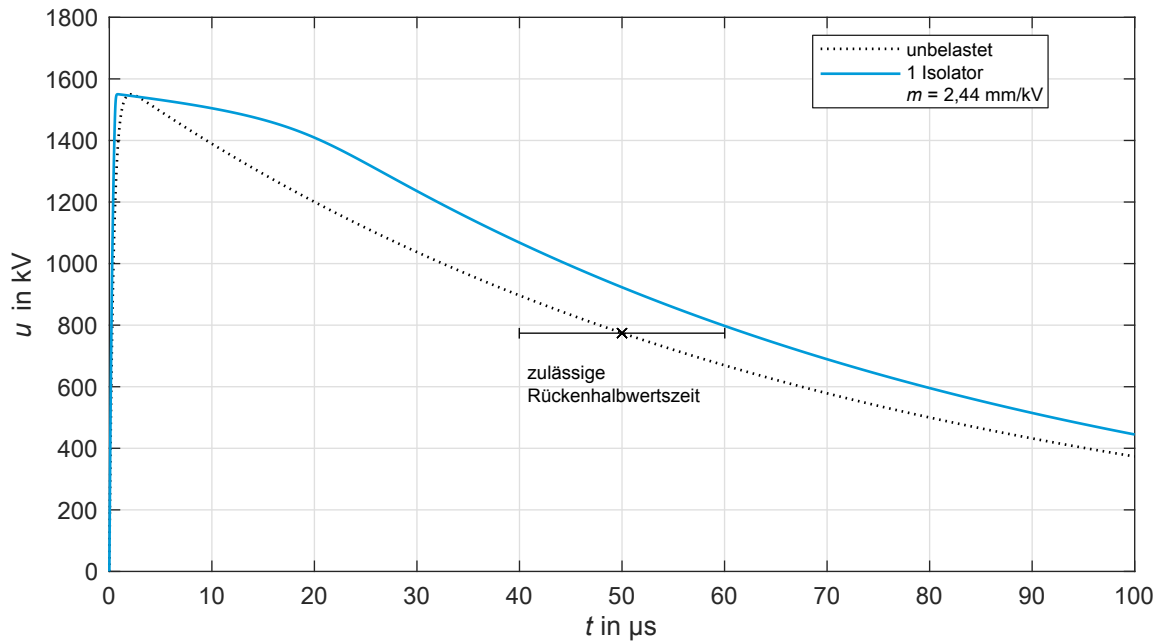
Die Simulation wurde zuerst mit einem Schottisolator aus dem Feldsteuermaterial mit der Kennlinie nach Abbildung 4.9 durchgeführt. Die Steigung dieser Kennlinie im nichtlinearen Bereich beträgt  $m = 2,15 \text{ mm/kV}$ . Wie in Abbildung 4.25 zu sehen ist, weicht der Spannungsverlauf bei Belastung durch einen nichtlinearen Prüfling (blau, keine Transparenz) kaum von dem ohne Belastung ab. Allerdings sinkt der Spannungsausnutzungsgrad des Marx-Generators durch die Belastung von  $\eta = 95,9\%$  auf  $94,1\%$ , wenn der Scheitelwert gehalten werden soll. Diese Reduktion des Spannungsausnutzungsgrades ist noch unproblematisch, es besteht aber ein Einfluss auf die Spannungsform, der mit steigender Anzahl an parallel zu prüfenden Isolatoren zunimmt.



**Abbildung 4.25.:** Prüfspannungsverläufe ohne und mit nichtlinearer Last ( $m = 2,15 \text{ mm/kV}$ )

Für eine größere Anzahl an parallelen Isolatoren – die in realen Prüfungen den üblichen Fall darstellen sollte – zeigt sich ein Trend hin zu kürzeren Stirnzeiten und längeren Rückenhalfwertszeiten. Bereits

<sup>12</sup> Damit ist die Erfüllung der Toleranzen von Scheitelwert, Stirnzeit und Rückenhalfwertszeit nach der Norm IEC 60060-1 gemeint [IEC60060].



**Abbildung 4.26.:** Prüfspannungsverläufe ohne und mit nichtlinearer Last ( $m = 2,44$  mm/kV)

ab sechs Isolatoren wird die Toleranz für die Stirnzeit verletzt ( $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ ). Zudem wird, wie in Abbildung 4.25 erkennbar ist, für elf parallel geschaltete Isolatoren die zulässige Rückenhalbwertszeit verletzt ( $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ ). Weiterhin steigt die notwendige Ladespannung mit der Anzahl zu prüfender Isolatoren und überschreitet für zwölf Prüflinge bereits die 2 MV.

Der Effekt wird weiter verdeutlicht, wenn anstelle des Feldsteuermaterials mit  $m = 2,15$  mm/kV ein Material mit steilerer Kennlinie von  $m = 2,44$  mm/kV eingesetzt wird (vgl. Abbildung 4.3.2). Wie in Abschnitt 4.13 beschrieben, würde ein solches Material bei  $E_{\text{LI}}$  eine spezifische Leitfähigkeit von bis zu  $4,43 \cdot 10^{-3}$  S/m erreichen und eine zu hohe spezifische Energie umsetzen, um für den Einsatz empfohlen zu werden. Eine Simulation unter Nutzung eines Isolators aus diesem Material resultiert im in Abbildung 4.26 blau markierten Spannungsverlauf. Es zeigt sich auch hier, dass die nichtlineare Last eine deutliche Abflachung des Spannungsverlaufs im Bereich des Scheitels verursacht. Die Forderungen von IEC 60060-1 in Bezug auf die Toleranzen von Stirn- und Rückenhalbwertszeit werden nicht erfüllt. Weiterhin ergibt sich ein Spannungsausnutzungsgrad von lediglich 76,18 %, womit auch in diesem Fall eine Ladespannung von mehr als 2 MV gewählt werden muss. An dieser Stelle soll wiederholt werden, dass dieses Ergebnis für die Simulation der Prüfung bei Nutzung eines überdurchschnittlich leistungsfähigen Generators erzielt wurde. Dies macht deutlich, dass nichtlineare Feldsteuermaterialien mit zu steiler Kennlinie und zu hoher spezifischer Sättigungsleitfähigkeit herkömmliche Prüfanlagen an ihre Grenzen treiben können.

Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse aus den hier beschriebenen Untersuchungen ableiten:

- Der Einsatz stark nichtlinearer Feldsteuermaterialien kann einen Einfluss auf die Prüfbarkeit durch Stoßspannungsgeneratoren ausüben.

- Wird bereits berücksichtigt, dass das Material nicht zu leitfähig werden darf, um nicht durch einen zu hohen Energieumsatz auszufallen, wird sich der Einfluss mit hoher Wahrscheinlichkeit in vertretbaren Grenzen halten.
- Je nach Anzahl der parallel zu prüfenden Isolatoren und des letztlich verwendeten Materials, sollte der zu erwartende Einfluss auf die Spannungsform geprüft und gegebenenfalls ein Stoßspannungsgenerator mit größerer Stoßkapazität genutzt werden.

#### 4.3.5 Anforderungskatalog

Die Wunschparameter des Feldsteuermaterials, die sich aus der Auslegung (vgl. Abschnitt 4.2 und 4.3.1) ergeben und im Rahmen der weiteren Betrachtungen (vgl. Abschnitte 4.3.2, 4.3.3 und 4.3.4) verfeinert wurden, sollen in diesem Abschnitt kurz zusammengefasst werden. Dabei wird auch der gesamte zulässige Auslegungsspielraum aufgezeigt. Abschließend wird die Realisierbarkeit der Wunschparameter kurz diskutiert.

Tabelle 4.3 fasst die Parameter zusammen, die ein nichtlineares Feldsteuermaterial aufweisen sollte, um zuverlässig und effektiv in einem Schottisolator für eine 500-kV-DC-GIL eingesetzt werden zu können. Dabei wird zwischen Parametern unterschieden, die *unbedingt zu erfüllen sind*, um eine Eigengefährdung durch das Material auszuschließen (rot markiert in Tabelle 4.3), sowie den Parametern die *idealerweise erfüllt werden sollten*, um den bestmöglichen Effekt durch das Feldsteuermaterial zu erzielen (blau markiert), und solchen, deren Einhalten eine Minimalanforderung darstellt, um das Feldsteuermaterial wirksam einzusetzen und einen Zugewinn an Robustheit erwarten zu dürfen (schwarz markiert).

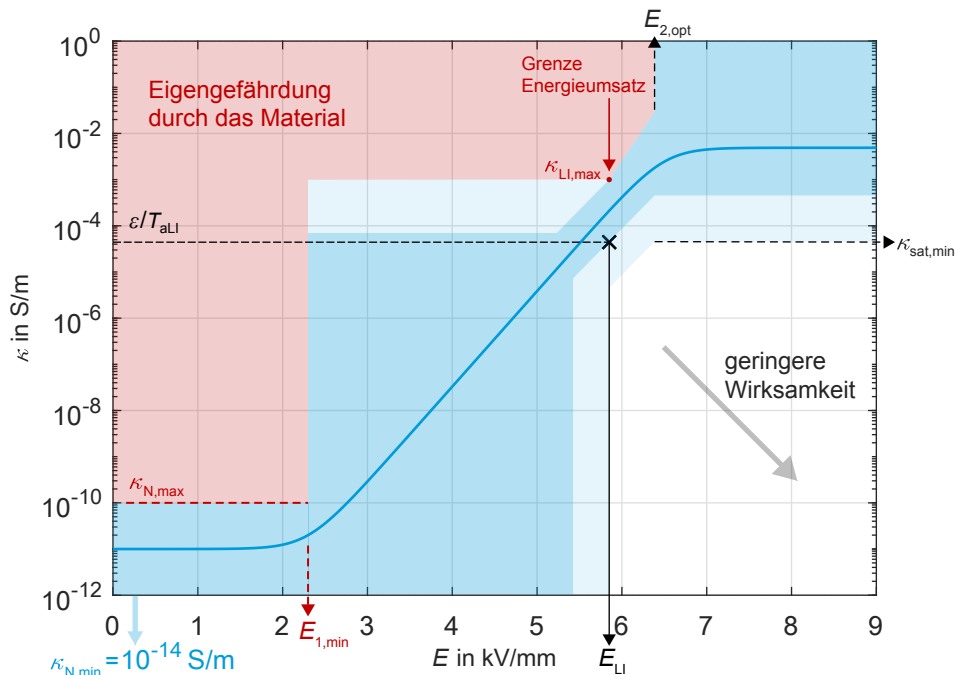
Einzelne Materialparameter können nicht endgültig angegeben werden, da sie wiederum eine Abhängigkeit von anderen Eigenschaften des Feldsteuermaterials aufweisen. Beispielsweise kann für  $\kappa_{LI,max}$  ein größerer Wert zugelassen werden, wenn das gewählte Feldsteuermaterial über ein höheres Energieaufnahmevermögen als  $17,4 \text{ J/cm}^3$  verfügt. Auf diese Abhängigkeiten wird ebenfalls in Tabelle 4.3 hingewiesen.

**Tabelle 4.3.: Wunschparameter nichtlineares Feldsteuermaterial**

Parameter	Formelzeichen	Wert	abhängig von
min. Schaltfeldstärke	$E_{1,min}$	2,3 kV/mm oder 3,47 kV/mm	Prüfungen
max. Schaltfeldstärke	$E_{1,max}$	5,85 kV/mm	-
max. spez. Leitfähigkeit bei $E_N$	$\kappa_{N,max}$	$10^{-10} \text{ S/m}$	-
min. spez. Leitfähigkeit bei $E_N$	$\kappa_{N,min}$	$10^{-14} \text{ S/m}$	-
max. spez. Leitfähigkeit bei $E_{LI}$	$\kappa_{LI,max}$	$1 \cdot 10^{-3} \text{ S/m}$	$w_{auf}$
min. spez. Sättigungsleitfähigkeit	$\kappa_{sat,min}$	$4,43 \cdot 10^{-5} \text{ S/m}$	-
opt. Sättigungsfeldstärke	$E_{2,opt}$	$> 5,85 \text{ kV/mm}$	-
opt. Steigung der Kennlinie	$m_{opt}$	1,87...3,21 mm/kV	$E_1; \kappa_N; \kappa_{LI,max}$
Auslegungsenergiedichte	$w_{design}$	0,079...3,5 J/cm <sup>3</sup>	$\kappa_{LI,max}; m$

Das Hauptziel der Auslegung ist die bestmögliche Reduktion der maximal auftretenden Tangentialfeldstärke entlang des Schottisolators, speziell für den Fall der überlagerten Blitzstoßspannung nach

elektrischer und thermischer Vorbelastung. Wird zusätzlich die bestmögliche Reduktion bei Schaltstoßspannung gefordert, muss die Auslegung geprüft werden.



**Abbildung 4.27.:** Auslegungsspielraum für stark nichtlineare Feldsteuermaterialien zum Einsatz in konischen Schottisolatoren einer 500-kV-DC-GIL, blau hinterlegt: zulässiger Auslegungsspielraum, dunkler hinterlegt: idealer Auslegungsbereich, Kennlinie: Beispiel für effektives Material

Der sich ergebende Auslegungsspielraum ist in Abbildung 4.27 dargestellt. Die Anforderungen sind gegenüber den bisherigen Entwurfsmethoden verfeinert (vgl. Abbildung 2.17 und 4.9). Der Bereich, in dem sich die Kennlinie eines Materials idealerweise bewegen sollte, um eine effektive Feldsteuerung zu ermöglichen, ist **blau** (dunkler) hinterlegt. Der hellblau hinterlegte Bereich markiert den erweiterten Auslegungsspielraum, in dem immer noch eine Verbesserung gegenüber einem ungesteuerten Isoliersystem zu erwarten ist. Der Einsatz eines Feldsteuermaterials, dessen Kennlinie rechts unterhalb des Auslegungsspielraums liegt, ist als unkritisch aber vergleichsweise weniger wirksam einzustufen. In diesen Bereich fallen die moderat nichtlinearen Feldsteuermaterialien, welche in Abschnitt 4.4 gesondert behandelt werden. Unter keinen Umständen darf ein Material eingesetzt werden, dessen Kennlinie links oberhalb des blau markierten Auslegungsspielraums, also im **rot** markierten Bereich, liegt. Diese Grenze ergibt sich durch die im Material umgesetzte Verlustleistung bzw. den Energieumsatz. Wird ein Feldsteuermaterial eingesetzt, dessen Kennlinie im **rot** markierten Bereich liegt, kann dies zur Zerstörung des Isoliersystems führen.

Die Möglichkeit, ein Material zu finden, welches die gezeigten Grenzen einhält, soll im Folgenden kurz diskutiert werden:

- Die minimale Schaltfeldstärke  $E_{1,min}$  ist als einer der kritischsten Parameter einzustufen. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten stark nichtlinearen Feldsteuermaterialien sind alle der Klasse der Mikrovaristoren zuzuordnen und weisen geringere Schaltfeldstärken auf (vgl. Abschnitt 6.2.1). In der Literatur konnte jedoch ein Hinweis darauf gefunden werden, dass bereits erfolgreich Mi-

kovaristoren mit einer Schaltfeldstärke von etwa 3,5 kV/mm hergestellt wurden [Don2011]. Die maximale Schaltfeldstärke ist vor diesem Hintergrund als unkritischer Parameter einzustufen.

- Viele der bisher untersuchten Mikrovaristorverbundstoffe weisen bei geringen Feldstärken spezifische Leitfähigkeiten von weniger als  $10^{-10}$  S/m auf, zeigen allerdings schon unterhalb von  $E_1$  eine gewisse Nichtlinearität (siehe Abschnitt 6.1.1). Hierdurch überschreiten sie häufig die geforderte Grenze der maximal zulässigen spezifischen Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke  $\kappa_{N,max}$ . Auch hier sei auf die Literatur verwiesen, nach der geeignete Materialien offensichtlich herstellbar sind [Don2011]. Die minimale gewünschte spezifische Leitfähigkeit wird von den meisten bisher untersuchten Feldsteuermaterialien übertroffen.
- Eine Einschätzung der Realisierbarkeit der maximal zulässigen spezifischen Leitfähigkeit während einer Blitzstoßspannung  $\kappa_{LI,max}$  konnte noch nicht erfolgen. Die Untersuchung ist erst bei Feldsteuermaterialien sinnvoll, die eine ausreichend hohe Schaltfeldstärke aufweisen.
- Die minimale spezifische Sättigungsleitfähigkeit  $\kappa_{sat,min}$  wird, wie in Abschnitt 6.2.1 gezeigt, von den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Mikrovaristorverbundstoffen übertroffen. Auch die sich indirekt ergebende Forderung einer spezifischen Sättigungsleitfähigkeit, die neun Größenordnungen über der spezifischen Grundleitfähigkeit liegt, wird teilweise erfüllt.
- Die bisher untersuchten Mikrovaristorverbundstoffe weisen eine deutlich geringere Sättigungsfeldstärke  $E_2$  auf als für den optimalen Einsatz gewünscht. Da dieser Wert in der Literatur bisher kaum Beachtung findet (Ausnahmen: [Eri2015], [Son2012]), kann zu diesem Zeitpunkt nur schwer eine Einschätzung der Realisierbarkeit des gewünschten Wertes getroffen werden.
- Die gewünschte Steigung  $m$  der Kennlinie wurde von den hier untersuchten Mikrovaristoren übertroffen. Damit wäre immer noch der Betrieb mit überausgelegter Kennliniensteigung möglich. Ein Vergleich der Anforderung mit der Literatur fällt schwer, da oft der Nichtlinearitätsexponent  $\alpha$  angegeben wird. Für die in Abbildung 4.9 gezeigte Kennlinie nimmt  $\alpha$  Werte von bis zu 29 an. Vor dem Hintergrund, dass in der Literatur Werte zwischen 20 und 30 angegeben werden [Don2011], erscheint dies realisierbar.
- Das Energieaufnahmevermögen  $w_{auf}$  von Feldsteuermaterialien hat bisher nur vereinzelt Beachtung gefunden. Erste Messungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass der geforderte Wert eine hohe, aber erfüllbare Anforderung darstellt, wie in Abschnitt 6.2.2 aufgezeigt wird.

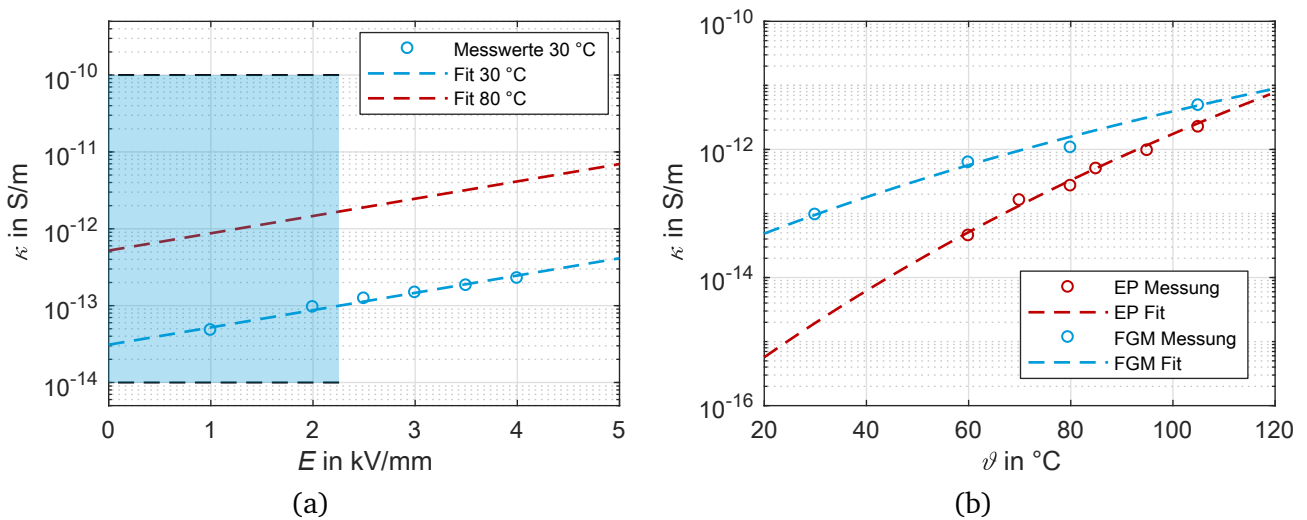
Die hier gezeigten Grenzen werden nach dem aktuellen Stand des Wissens nicht gleichzeitig von einem derzeit verfügbaren Material eingehalten. Es wird deutlich, dass speziell für Anwendungen mit hohen Feldstärken bisher kaum Feldsteuermaterialien entwickelt wurden und die Anforderungen in diesem Bereich als herausfordernd eingestuft werden müssen. Speziell der spezifischen Leitfähigkeit bei  $E_{LI}$  und der damit verbundenen Forderung an das Energieaufnahmevermögen sowie den Auswirkungen auf die Prüfbarkeit muss Beachtung geschenkt werden.

Allerdings zeigt die verfeinerte Darstellung des Auslegungsspielraums auch, dass ausreichend große Toleranzbereiche bestehen, in denen sich die Kennlinien von effektiven Materialien bewegen können. Unter Betrachtung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Ergebnisse und der Literatur ist es als wahrscheinlich zu beurteilen, ein passendes Feldsteuermaterial entwickeln zu können.



#### 4.4 Strategie 2: Einsatz moderat nichtlinearer Feldsteuermaterialien

Im Gegensatz zur Nutzung stark nichtlinearer Feldsteuermaterialien birgt der Einsatz von moderat nichtlinearen Materialien geringere Risiken. Auch lassen sich die Materialien einfacher auswählen, respektive auslegen, wie in diesem Absatz gezeigt werden soll. Durch die geringere Steigung der Kennlinie in Abhängigkeit der Feldstärke ( $m_0 < 1 \text{ mm/kV}$ ) und das Nichtvorhandensein eines Schaltpunktes ist die Wahrscheinlichkeit geringer, die zulässige spezifische Leitfähigkeit im Dauerbetrieb zu überschreiten und damit ein thermisches Weglaufen des Isolators zu provozieren. Auch spielen die Energieaufnahme bei Impulsspannungsbeanspruchung und die Frage nach der Prüfbarkeit in diesem Fall eine untergeordnete Rolle.



**Abbildung 4.28.:** (a)  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie des eingesetzten moderat nichtlinearen Feldsteuermaterials für 30 °C und 80 °C, angenähert mit  $m_0 = 0,225 \text{ mm/kV}$ , (b) Vergleich der Temperaturabhängigkeit der spez. elektrischen Leitfähigkeit von Epoxidharzformstoff EP1 und dem hier eingesetzten Feldsteuermaterial (gemessen bei 2 kV/mm), nach [Sec2015]

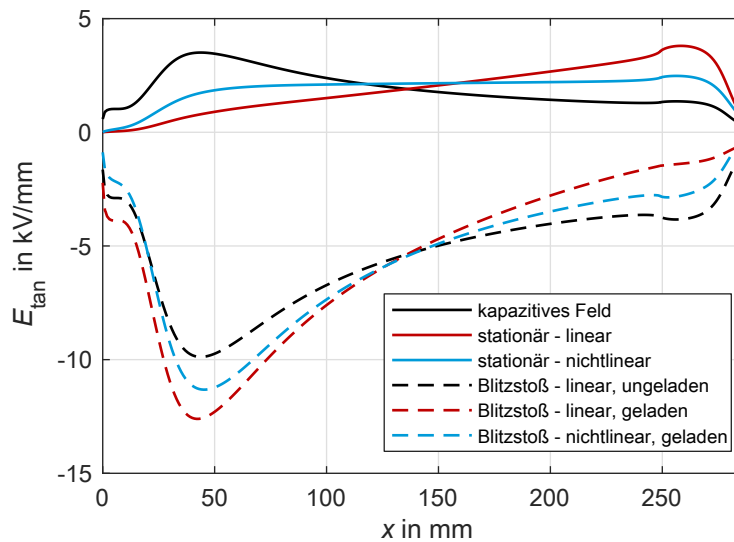
Das Feldsteuermaterial muss nur den bereits in Abschnitt 4.2 aufgezeigten Anforderungen an die spezifische Leitfähigkeit im Dauerbetrieb genügen. Diese muss zwischen  $10^{-14} \text{ S/m}$  und  $10^{-10} \text{ S/m}$  liegen, um einerseits ausreichend hoch zu sein, um die Feldverteilung zu dominieren, und andererseits die Eigenerwärmung in vertretbaren Grenzen zu halten. Diese Anforderungen sind in der Kennlinie in Abbildung 4.28 (a) eingefügt. Prinzipiell kann jedes Material eingesetzt werden, dessen Kennlinie innerhalb dieser Grenzen liegt. Die gezeigte Kennlinie wurde an einem Verbundstoff aus Iriotec® und Epoxidharz ermittelt (MFF2, vgl. Abschnitt 6.1.1) und erfüllt die Anforderungen. Für die im Folgenden gezeigten Simulationen wurden die elektrischen Eigenschaften mittels der Annäherung nach Gleichung 4.2 nachgebildet und als Materialparameter dem Modell übergeben.

$$\kappa(T; E) = \kappa_0 \cdot e^{-\frac{W_a}{k_B \cdot T}} \cdot 10^{m_0 \cdot E} \quad (4.2)$$

Neben der moderaten Nichtlinearität kann ein Vorteil realer nichtlinearer Feldsteuermaterialien darin liegen, dass sie eine vergleichsweise geringe Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von der Temperatur aufweisen. Im Fall des hier genutzten Materials beträgt die Aktivierungsenergie  $W_a = 0,52 \text{ eV}$ , was bedeutet, dass die Abhängigkeit geringer ausgeprägt ist als beim als Referenz angesehenen Epoxidharzformstoff EP1. Abbildung 4.28 (b) zeigt den direkten Vergleich der spezifischen Leitfähigkeit über der Temperatur für eine Messfeldstärke von  $2 \text{ kV/mm}$ . Ebenfalls eingefügt ist die Anpassungsfunktion der Temperaturabhängigkeit nach Gleichung 4.2.

Weiterhin weisen die meisten Feldsteuermaterialien eine höhere relative Permittivität auf als herkömmliche Isolierstoffe, was zu einer ausgeprägteren Steuerung während transients Überspannungen führt.

Als Modell wird auch an dieser Stelle auf den bereits vorgestellten Schottisolator (vgl. Abbildung 2.1, Abschnitt 2.1.1) zurückgegriffen. Analog zu Abschnitt 4.3.1 wird ebenfalls mit einer Temperaturdifferenz von  $\Delta\vartheta = 30 \text{ K}$ , einer dauerhaft anliegenden Gleichspannung von  $U_{DC} = 550 \text{ kV}$  und einer gegenpolaren Blitzstoßspannung von  $U_{LI} = -1550 \text{ kV}$  gerechnet.



**Abbildung 4.29.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines Schottisolators,  $\Delta\vartheta = 30 \text{ K}$ ;  $U_{DC} = 550 \text{ kV}$ ;  $U_{LI} = -1550 \text{ kV}$ ; moderat nichtlineares FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.28 (a) (schwarz: kapazitive Feldverteilung ohne Ladungsträgerakkumulation, rot: linearer Isolierstoff, blau: moderat nichtlineares Feldsteuermaterial)

Wie Abbildung 4.29 entnommen werden kann, stellt sich auch bei Nutzung des moderat nichtlinearen Feldsteuermaterials eine gleichmäßigte stationäre Feldverteilung ohne ausgeprägte Feldinversion ein. Hierdurch wird die maximal auftretende Tangentialfeldstärke im Dauerbetrieb um 34,8 % gesenkt.

Zusätzlich dargestellt ist die Verteilung der Feldstärke, die sich im Moment des Einschaltens einstellt (kapazitive Feldverteilung). Dass die stationäre Feldverteilung bei Nutzung des Epoxidharzformstoffs weiter von der kapazitiven Verteilung abweicht als die bei Einsatz des Feldsteuermaterials, ist ein Indikator für die ausgeprägtere Ansammlung von Flächen- und Raumladungen. Dies wird durch die Auswertung der Verhältnisse im Moment des Scheitels einer Blitzstoßspannung mit umgekehrter Polarität bestätigt. Sowohl für den Epoxidharzformstoff als auch für das Feldsteuermaterial ergibt sich durch die

---

Überlagerung des Feldes, welches durch die akkumulierten Ladungsträger erzeugt wird, eine gegenüber der rein kapazitiven Verteilung erhöhte Maximalfeldstärke.

In diesem Fall tritt keine Vergleichmäßigung der Feldstärke durch das Feldsteuermaterial ein, da die spezifische Leitfähigkeit zu gering bleibt, um die Ausbildung eines resistiven Strömungsfeldes zu ermöglichen. Die Ladungsträger können, mit anderen Worten, nicht schnell genug bewegt werden<sup>13</sup>. Allerdings bewirkt die geringere Ladungsträgeransammlung eine Reduktion der maximal auftretenden Tangentialfeldstärke um etwa 9 %. Dies ist verglichen mit der möglichen Reduktion um bis zu ca. 51 % durch stark nichtlineare Materialien zwar deutlich geringer ausgeprägt, kann aber durch ein einfacher handzuhabendes Material erzielt werden.

Weiterhin wird die Robustheit der zu erwartenden Feldverteilung durch den Einsatz des Feldsteuermaterials erhöht, da die spezifische Leitfähigkeit über einen weiten Temperaturbereich höher ausfällt als bei einem herkömmlichen Epoxidharzformstoff. Auf diese Weise fällt der Einfluss der weniger kontrollierbaren spezifischen Leitfähigkeiten von Isoliergas und Isolatoroberfläche geringer aus. Die Wahrscheinlichkeit, dass das feldbestimmende Medium des Isoliersystems durch eine Veränderung der Umgebungsbedingungen wechselt, wird hierdurch ebenfalls reduziert. Die höhere spezifische Leitfähigkeit erlaubt zudem das Abfließen von Ladungsträgern, die nicht aufgrund der stationären Feldverteilung auf der Isolatoroberfläche akkumulieren, sondern beispielsweise durch kurzzeitig auftretende Teilentladungen (sogenannte *Störladungen*). Für Systeme, bei denen der Auslegungsaufwand für ein stark nichtlineares Material nicht lohnend erscheint, da der Einsatz als riskant eingestuft wird, oder kein Material verfügbar ist, das den Anforderungskatalog erfüllt (vgl. Tabelle 4.3), kann der Einsatz eines moderat nichtlinearen Feldsteuermaterials eine sinnvolle Alternative darstellen.

---

#### 4.5 Einsatz von Feldsteuermaterialien als Beschichtung

---

Wie in den beiden vorangegangenen Abschnitten gezeigt werden konnte, bietet der Einsatz nichtlinearer Feldsteuermaterialien das Potential, das Isoliervermögen von Gleichspannungsisoliersystemen zu verbessern. Hierzu wurde der einfache Ansatz gewählt, das gesamte Volumen des Isolators aus Feldsteuermaterial auszugestalten. Dieser Ansatz mag aus Sicht der Fertigung einfach erscheinen, da nur ein Material eingesetzt werden muss, allerdings wird so eine große Menge eines potentiell teuren Werkstoffes benötigt. Daher soll untersucht werden, ob sich auch Beschichtungen dazu eignen, die Feldverteilung ähnlich zu verbessern, wie dies mit der Nutzung des Vollmaterials möglich ist.

Allerdings können Beschichtungen in Form dünner Lackschichten für Isolatoren gasisolierter Schaltanlagen als kritisch angesehen werden, da ein Abplatzen oder Zerkratzen der Lackierung durch Krafteinwirkung beim Einbau nicht ausgeschlossen werden kann. Darum wird der Begriff der Beschichtung auf *Volumenschichten* erweitert, womit Schichtdicken ab einem Millimeter Dicke gemeint sind. Diese sollten eine ausreichende Robustheit aufweisen.

Auch aus elektrischer Sicht wurde der Einsatz von Beschichtungen und Lackierungen in der Literatur mehrfach behandelt und stellenweise kritisch diskutiert [Mes1998], [Vol2004], [Lor2009]. Daher soll im Vorfeld der eigentlichen Untersuchung geprüft werden, auf welcher Grundlage die kontroversen Ergebnisse zum Einsatz von Beschichtungen basieren.

---

<sup>13</sup> Dies führt auch dazu, dass in diesem Fall der Feldrückstoß-Effekt nicht auftritt, vgl. Abschnitt 4.3.3.

---

Im Anschluss wird untersucht, ob sich Beschichtungen aus einem nichtlinearen Feldsteuermaterial dazu eignen, die Feldverteilung entlang des bereits vorgestellten Schottisolators zu vergleichmäßigen. Weiterhin soll die Frage beantwortet werden, wie abhängig die Wirksamkeit des Materials von der Dicke der Beschichtung ist.

---

#### 4.5.1 Grundlegende Untersuchungen zur Beschichtung von Isolatoren

---

Bereits in frühen Versuchen mit gasisolierten Systemen für Gleichspannungsanwendungen konnten Flächenladungen auf den Isolatoren als ein potentiell Problem ausgemacht werden [Nak1983], [Nit1991]. In der Folge wurden unter anderem halbleitfähige Lackierungen als Abhilfemaßnahme untersucht [Mes1999], [Mes2002], allerdings mit gemischten Resultaten, weshalb vom Einsatz solcher Beschichtungen teilweise abgeraten wurde [Vol2004]. Ein Argument gegen den Einsatz ist die Erhöhung der Feldstärken in Tripelpunkten, die mit der Vergleichmäßigung der Feldstärke einherging.

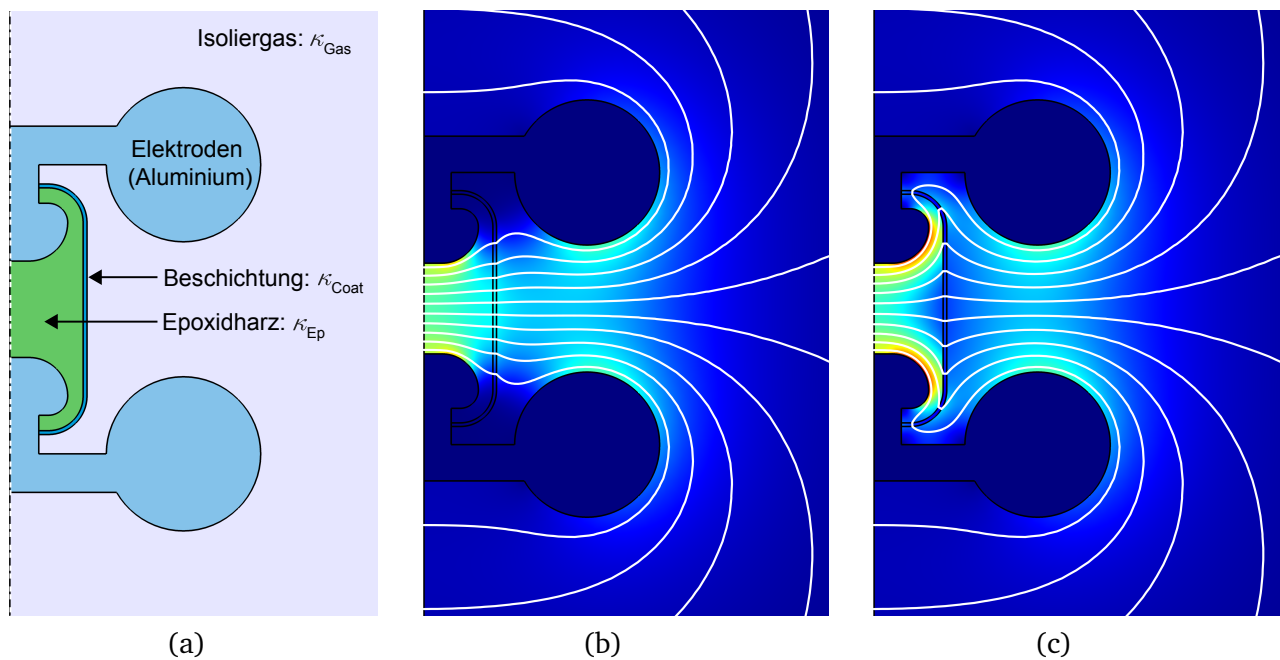
Es sollte erwähnt werden, dass die Beschichtungen häufig als Maßnahmen gesehen wurden, um herkömmliche Isolatoren für Gleichspannungen zu ertüchtigen. Das Design des Isoliersystems wurde nur selten an den Einsatz der Beschichtung angepasst [Mes1998], [Vol2004]. Weiterhin wurde oft mit linearen oder schwach nichtlinearen Beschichtungen gearbeitet, wodurch sich weitere Unterschiede zu den Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit ergeben.

Im Folgenden soll der Effekt der Feldanhebung in den Tripelpunkten durch eine lineare Beschichtung reproduziert werden. Im Anschluss wird geprüft, ob durch eine Designanpassung des Isolators ein sinnvoller Einsatz der Beschichtung ermöglicht wird. Hierzu werden Feldsimulationen für den stationären Betriebsfall durchgeführt. Als Ausgangspunkt der Untersuchungen wird exemplarisch ein Stützisolator herangezogen, dessen Geometrie an eine bereits in der Literatur behandelte angelehnt wurde (siehe Abbildung 4.30 (a)) [Vol2004]. Die Feldverteilung ohne Beschichtung des Isolators ( $\kappa_{\text{Coat}} = \kappa_{\text{Ep}} = 10^{-14} \text{ S/m}$ ) ist in Abbildung 4.30 (b) dargestellt.

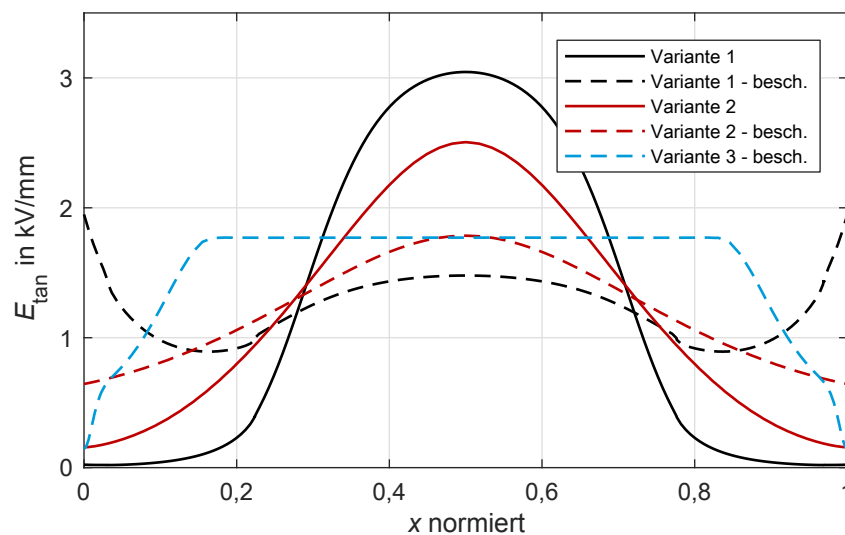
Die elektrisch linear leitfähige Beschichtung wurde mit  $\kappa_{\text{Coat}} = 10^{-12} \text{ S/m}$  modelliert. Wie in Abbildung 4.30 (c) zu erkennen ist, wirkt die Beschichtung als Spannungsteiler und reduziert die maximal entlang des Isolators auftretende Feldstärke. Allerdings ist die Feldstärke in der Nähe der Tripelpunkte und im Gasvolumen zwischen der äußeren Schirmelektrode und dem Isolator erhöht. Die beiden Effekte sind ebenfalls in Abbildung 4.31 gut zu erkennen.

Die Ursache für die Feldüberhöhung ist das Verjüngen des Stützisolators durch seinen Rundungsradius. Die Stromquerschnittsfläche der Beschichtung nimmt gegen die Ränder hin ab, woraus ein steigender Widerstandsbelag resultiert, der wiederum einen größeren Spannungsfall hervorruft. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass sich ein Beschichten ohne vorherige Betrachtung der Geometrie nachteilig auswirken kann.

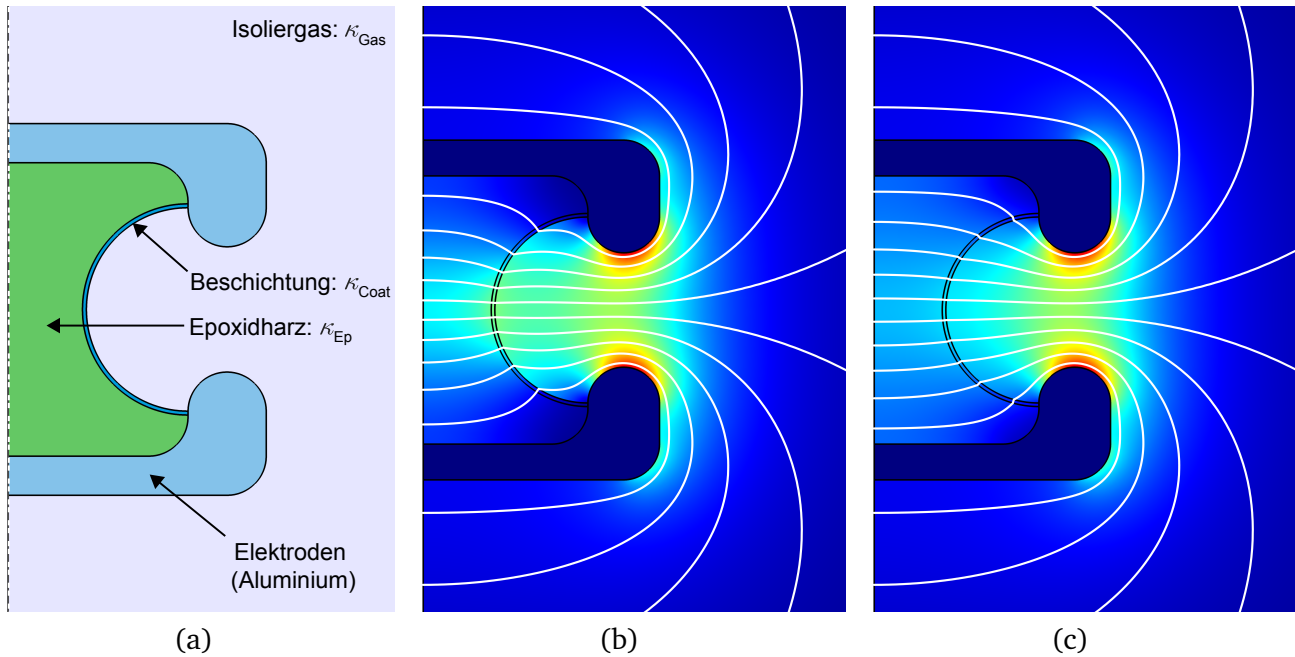
Betrachtet man stattdessen die Geometrie nach Abbildung 4.32, die ebenfalls in der Literatur diskutiert wird (vgl. [Lor2009], [Vol2004]), lässt sich insgesamt eine Verbesserung der Feldverteilung durch die Beschichtung feststellen. Durch die Formgebung nimmt der Widerstandsbelag gegen die Tripelpunkte hin ab. Hierdurch fällt der Effekt der Feldanhebung im Bereich der Tripelpunkte weniger stark aus. Gleichzeitig wird die Feldverteilung entlang der Oberfläche des Isolators vergleichmäßigt (vgl. Abbildung 4.31). Der Einsatz einer linearen Feldsteuerschicht kann für diese Geometrie sinnvoll sein.



**Abbildung 4.30.:** Isolatortypen zur Untersuchung von Beschichtungen, nach [Vol2004], (a) Geometrie, (b) Feld- und Äquipotentiallinienverteilung ohne Beschichtung ( $\kappa_{\text{Coat}} = \kappa_{\text{Ep}}$ ), (c) Feld- und Äquipotentiallinienverteilung mit Beschichtung (linear,  $\kappa_{\text{Coat}} = 10^{-12} \text{ S/m}$ )



**Abbildung 4.31.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der Modellgeometrien; durchgezogen: unbeschichtet, strichliert: beschichtet, schwarz: Isolatortypen 1 (vgl. Abbildung 4.30), rot: Isolatortypen 2 (vgl. Abbildung 4.32), blau: Isolatortypen 3 (vgl. Abbildung 4.33)



**Abbildung 4.32.:** Isolatortyp 2 zur Untersuchung von Beschichtungen, nach [Vol2004], [Lor2009],  
 (a) Geometrie, (b) Feld- und Äquipotentiallinienverteilung ohne Beschichtung ( $\kappa_{\text{Coat}} = \kappa_{\text{Ep}}$ ), (c) Feld- und Äquipotentiallinienverteilung mit Beschichtung (linear,  $\kappa_{\text{Coat}} = 10^{-12} \text{ S/m}$ )

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei weitere Ansätze entwickelt, um Beschichtungen vorteilhaft einzusetzen. Der erste ist die *Variation der Beschichtungsdicke*: Eine dickere Beschichtung in Richtung der Tripelpunkte führt zu einer Entlastung in diesem Bereich. Der zweite Ansatz ist eine Anpassung der Elektroden: Bei Einsatz von Feldsteuerschichten wird der Einsatz der großen, eingelassenen Schirmelektrode im Isolatorinneren unnötig. Diese kann durch eine deutlich flachere Elektrode ersetzt, oder sogar weggelassen werden. Wird eine weitere Reduktion der Feldstärke im Tripelpunkt gewünscht, kann diese am effektivsten durch den Einsatz von *Elektroden im Volumen des Feldsteuermaterials* erzielt werden. Abbildung 4.33 zeigt den Effekt der beiden Maßnahmen in Kombination.

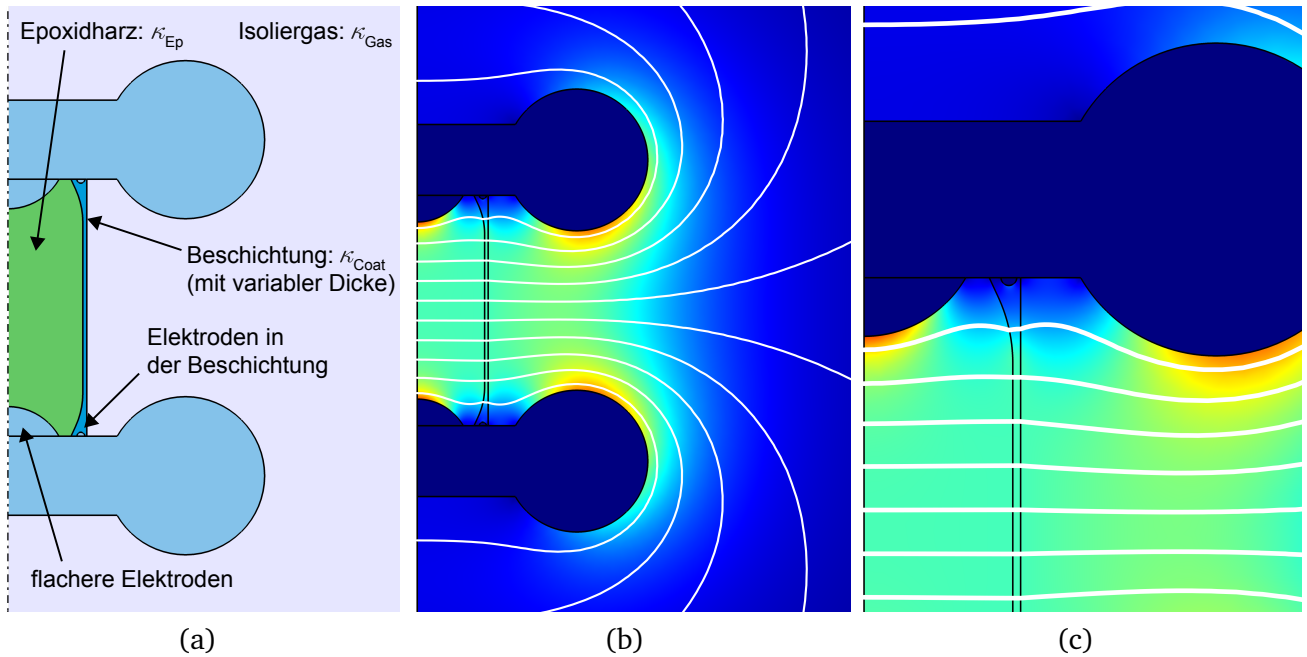
Die Verteilungen der Tangentialfeldstärke entlang der Isolatoroberfläche der verschiedenen Varianten sind in Abbildung 4.31 zusammengefasst<sup>14</sup>. Es zeigt sich, dass alle beschichteten Varianten eine Reduktion der Maximalfeldstärke bewirken. Bei Variante 1 ist die Beschichtung trotzdem nicht vorteilhaft, da hier die Erhöhung der Feldstärke im Tripelpunkt als nachteilig beurteilt werden muss. Bei den Varianten 2 und 3 kann durch die Beschichtung beziehungsweise das neue Design ein positiver Effekt beobachtet werden.

Es ist anzumerken, dass bei den hier gezeigten Untersuchungen davon ausgegangen wurde, dass die spezifische Leitfähigkeit der Feldsteuerschicht deutlich über der spezifischen Leitfähigkeit des umgebenden Isoliergases liegt. Dies sollte bei real genutzten Beschichtungen typischerweise zutreffen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Beschichtung eines Isolators nicht ohne Berücksichtigung seiner Geometrie durchgeführt werden sollte. Sehr vorteilhafte Ergebnisse lassen sich erzielen,

<sup>14</sup> Durch die Geometrien ergeben sich unterschiedliche Längen der Auswertelinie, daher wird hier die normierte Länge genutzt.





**Abbildung 4.33.:** Isolatorvariante 3 zur Untersuchung von Beschichtungen, (a) Geometrie, (b) Feld- und Äquipotentiallinienverteilung mit Beschichtung (linear,  $\kappa_{\text{Coat}} = 10^{-12} \text{ S/m}$ ), (c) Detailansicht im Bereich des Tripelpunktes

wenn Geometrie und Beschichtung von Anfang an zusammenhängend im Designprozess berücksichtigt werden.

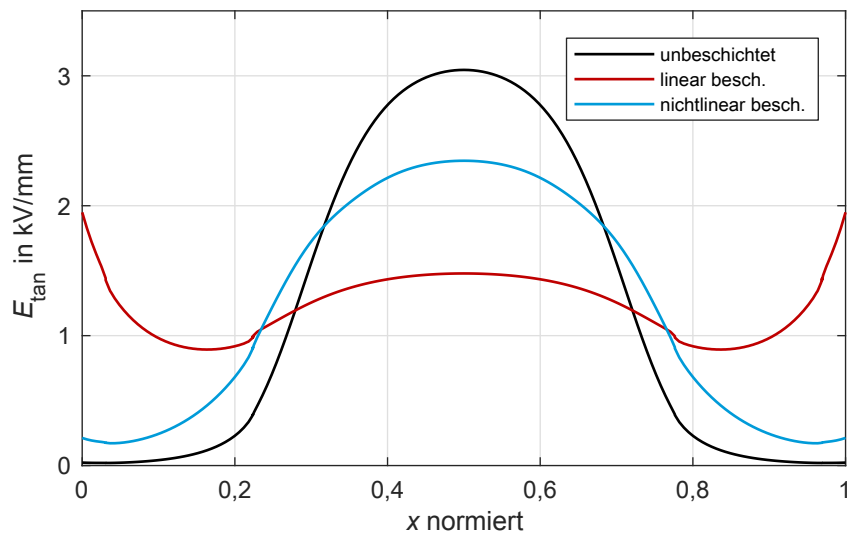
#### 4.5.2 Einsatz von nichtlinearen Beschichtungen

Wird anstelle der linearen Beschichtung der Einfluss einer Beschichtung mit nichtlinearer  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie betrachtet, ergibt sich oft auch ohne eine spezielle Designanpassung eine vorteilhafte Feldverteilung. Ursache hierfür ist der Effekt der Feldvergleichmäßigung, der bereits in Abschnitt 2.3.3 beschrieben wurde. Dies wird deutlich bei Betrachtung von Abbildung 4.34, in der die Feldverteilungen von Isolatorvariante 1 (vgl. vorheriger Abschnitt) mit linearer und nichtlinearer Beschichtung verglichen werden.

Hieraus kann jedoch nicht der Schluss gezogen werden, dass jeder Isolator durch eine Beschichtung mit nichtlinearem Feldsteuermaterial verbessert werden kann. Der Einfluss der Feldsteuerschicht muss für jede Geometrie geprüft werden. Allerdings können sich Vereinfachungen ergeben.

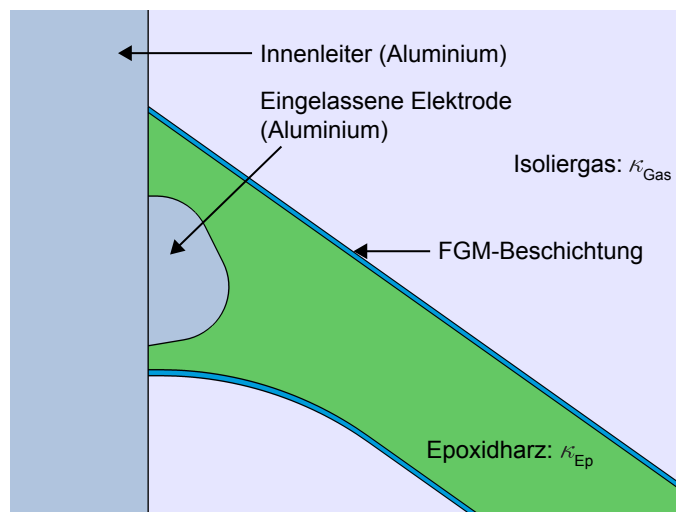
Im Folgenden soll untersucht werden, ob sich die Feldverteilung entlang des bisher betrachteten Schottisolators auch durch eine nichtlineare Beschichtung anstatt durch eine Ausführung aus Vollmaterial verbessern lässt. Dazu wird das bisher betrachtete Modell genutzt (vgl. Abbildung 2.1 und Abschnitt 4.3) und um eine Beschichtung mit variabler Dicke ergänzt. Die äußere Kontur des Schottisolators wird dabei konstant gehalten. Für den inneren Teil des Isolators werden die Parameter des linearen Referenzisolierstoffs EP1 eingesetzt. Als Kennlinie des Feldsteuermaterials wird die in Abschnitt 4.3.1 entwickelte  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie zugrunde gelegt. Bei der vorliegenden Isolatorgeometrie unterscheiden sich die relevanten Distanzen kaum zwischen einer Auslegung für ein Vollmaterial oder





**Abbildung 4.34.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der Gas-Feststoff-Grenzfläche von Isolatorvariante 1, schwarz: unbeschichtet; rot: linear beschichtet mit  $\kappa_{\text{Coat}} = 10^{-12} \text{ S/m}$ ; blau: beschichtet mit nichtlinearem FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.9

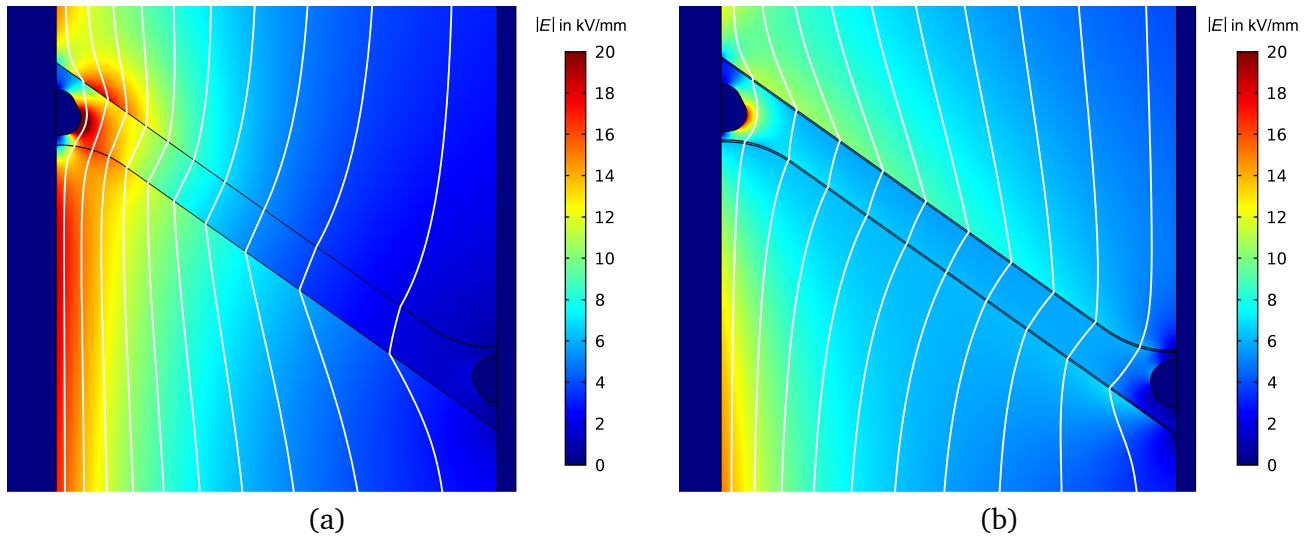
für eine Beschichtung. Aus diesem Grund kann die bereits entwickelte Kennlinie auch hier Verwendung finden. Ein Ausschnitt des Modells mit einer Schichtdicke von  $d = 1 \text{ mm}$  ist in Abbildung 4.35 gezeigt.



**Abbildung 4.35.:** Simulationsmodell zur Untersuchung des Einflusses von FGM-Beschichtungen (Detailansicht)

Untersucht wird hier wieder das Worst-Case-Szenario des überlagerten gegenpolaren Blitzstoßes. Die sich ergebende Feldverteilung für eine Beschichtung mit  $d = 1 \text{ mm}$  ist in Abbildung 4.36 der bereits ermittelten Verteilung bei Nutzung des herkömmlichen Isolatormaterials gegenübergestellt (im Moment des Blitzstoßscheitels). Ähnlich wie bei Nutzung des Feldsteuermaterials als Vollmaterial kann eine Vergleichmäßigung der Feldverteilung erreicht werden, die als vorteilhaft zu bewerten ist. Sowohl im Isolatorvolumen als auch im Gasraum werden die in der Nähe des Isolators auftretenden Maximalfeldstärken reduziert. Lediglich vor der eingelassenen Elektrode auf der Hochspannungsseite des Isolators kann die Feldstärke nicht so signifikant gesenkt werden, wie dies bei der Nutzung eines Vollmaterials

möglich ist (vgl. Abbildung 4.12). Mit einer maximalen Feldstärke von 18,3 kV/mm bei impulsförmiger Belastung ist dies in einem festen Isolierstoff allerdings als unkritisch anzusehen<sup>15</sup>.



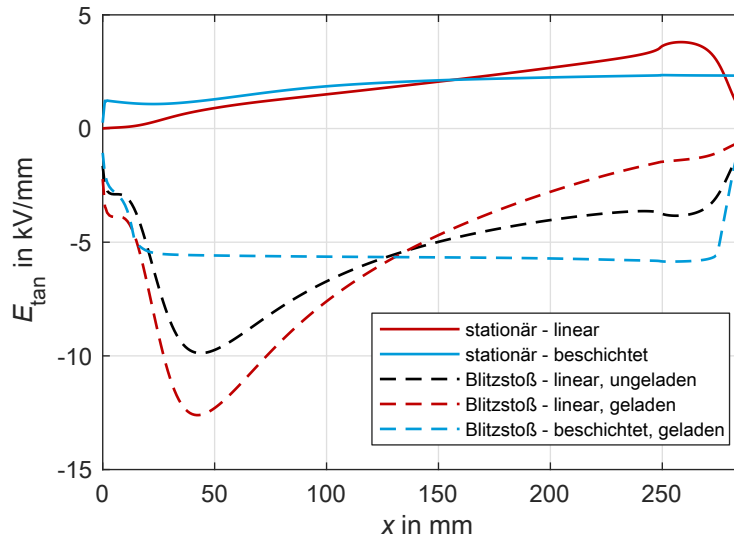
**Abbildung 4.36.:** Betrag der Feldstärke und Äquipotentiallinienverteilung des Isoliersystems mit konischem Schottisolator im Moment des Scheitels der Blitzstoßspannung, (a) linearer Isolierstoff EP1, (b) nichtlineares Feldsteuermaterial mit Kennlinie nach Abbildung 4.9 als 1 mm dicke Beschichtung

Die Verteilungen der Tangentialfeldstärke entlang der konvexen Seite des Isolators sind in Abbildung 4.37 gezeigt. Für die transienten Simulationen wird der Moment des Scheitelwerts der Spannung als Auswertzeitpunkt gewählt. Exemplarisch wird auch hier die Beschichtung mit einer Dicke von 1 mm betrachtet. Durch die Nutzung der Beschichtung wird eine sehr gute Vergleichmäßigung der Feldverteilung erzielt. Durch die Variation der Schichtdicke ergeben sich kaum Unterschiede im Bezug auf die maximal auftretende Tangentialfeldstärke, wie Tabelle 4.4 entnommen werden kann. Auf eine separate Darstellung wird daher an dieser Stelle verzichtet. Der signifikante Effekt der Beschichtung kann durch das ausgeprägte Verhältnis der spezifischen Leitfähigkeit der Feldsteuerschicht zum herkömmlichen Isolierstoff erklärt werden. Selbst als dünne Schicht stellt das Feldsteuermaterial damit eindeutig das feldbestimmende Medium im Isoliersystem dar.

**Tabelle 4.4.:** Ergebnisse des Einsatzes von FGM-Beschichtungen

Variante	$E_{\text{tan,max}}$ (in kV/mm)	Reduktion zu Referenz (in %)	$E_{\text{tripel,max}}$ (in kV/mm)
Referenzepoxidharzformstoff	12,60	-	0,63
FGM Vollmaterial	6,16	51,0	2,15
2 mm FGM-Beschichtung	5,86	53,5	4,97
1 mm FGM-Beschichtung	5,98	52,5	2,82
0,5 mm FGM-Beschichtung	6,19	50,8	2,32
0,2 mm FGM-Beschichtung	6,61	47,5	2,36
1 mm – mod. Geometrie	6,00	52,4	1,20

<sup>15</sup> Ohne Nutzung der Feldsteuerschicht würde sich im festen Isolierstoff eine maximale Feldstärke von 30,1 kV/mm ergeben.



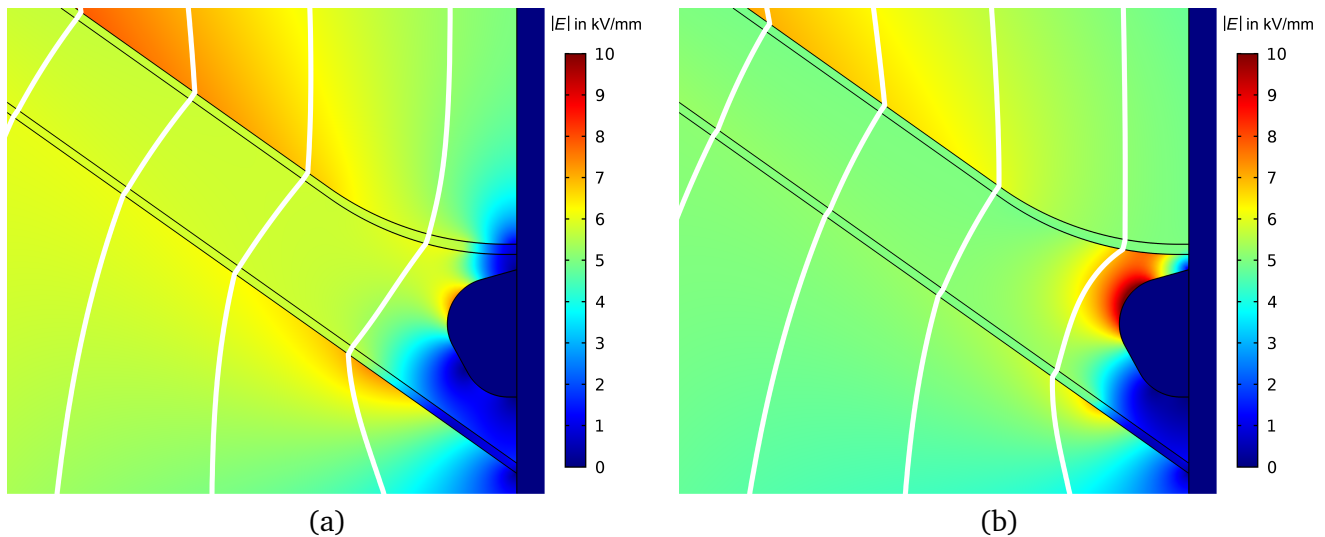
**Abbildung 4.37.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines Schottisolators,  $\Delta\vartheta = 30\text{ K}$ ;  $U_{\text{DC}} = 550\text{ kV}$ ;  $U_{\text{LI}} = -1550\text{ kV}$ ; nichtlineares FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.9 (schwarz: kapazitive Feldverteilung ohne Ladungsträgerakkumulation, rot: linearer Isolierstoff, blau: 1 mm dicke FGM-Beschichtung)

Auffällig ist dabei, dass durch die Beschichtung im stationären Zustand eine schlechtere Steuerung im Bereich der Tripelpunkte erreicht wird. Ebenfalls werden je nach Schichtdicke im Verlauf des Blitzstoßspannungsimpulses vergleichsweise hohe Feldstärken im Bereich der Tripelpunkte erreicht.

Feldstärken direkt in Tripelpunkten sind nicht als aussagekräftig anzusehen, da diese eine mathematische Singularität darstellen. In manchen Anordnungen ergeben sich in der Simulation bei ausreichender Annäherung an den Tripelpunkt beliebig hohe Feldstärken (vgl. Abschnitt 4.6). In der Realität tritt dieser Fall nicht ein. Stattdessen würden durch Feldinjektion und Teilentladungen Ladungsträger im Gasraum vor dem Tripelpunkt entstehen und Raumladungswolken bilden, welche den Bereich der höchsten Feldstärke abschirmen und somit entlasten. Es kommt zur sogenannten *Koronastabilisierung*. Gerade in Gleichspannungssystemen kann sich ein dauerhafter Gleichgewichtszustand aus den injizierten und abwandernden Ladungsträgern einstellen. Dies zu modellieren bedeutet allerdings einen erheblich erhöhten Rechenaufwand, zudem sollte der Effekt nicht in die Auslegung eines Isoliersystems eingehen.

Anstelle der Auswertung der Feldstärke direkt im Tripelpunkt wird daher eine Betrachtung der *Hintergrundfeldstärke* im Bereich des Tripelpunktes durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Feldstärke in einem oder mehreren Punkten in der Umgebung des Tripelpunktes ausgewertet wird, die jeweils nicht auf einer Materialgrenze liegen. Typischerweise werden hierzu Punkte im gasförmigen Isoliermedium gewählt, da dieses oft am stärksten belastet wird. In diesem Fall wird als Indikator der Absolutwert der Feldstärke in 1 mm Abstand zu Isolator und Kapselung auf der konvexen Seite des Isolators ausgewertet und der Maximalwert über den gesamten Simulationszeitraum gebildet (siehe  $E_{\text{tripel,max}}$  in Tabelle 4.4). Der höchste Wert der Feldstärke stellt sich in diesem Punkt häufig erst nach dem Scheitel der Blitzstoßspannung ein. Dies wird bei Betrachtung von Abbildung 4.38 besonders deutlich. Der Einfluss der eingelassenen Elektrode wird dadurch geschwächt, dass sie nicht im feldbestimmenden Medium eingesetzt wird.

Im Folgenden werden die in Abschnitt 4.5.1 entwickelten Strategien umgesetzt, um die Feldverteilung bei Nutzung von Volumenschichten zu optimieren: Die Feldsteuerschicht wird zum einen in Richtung



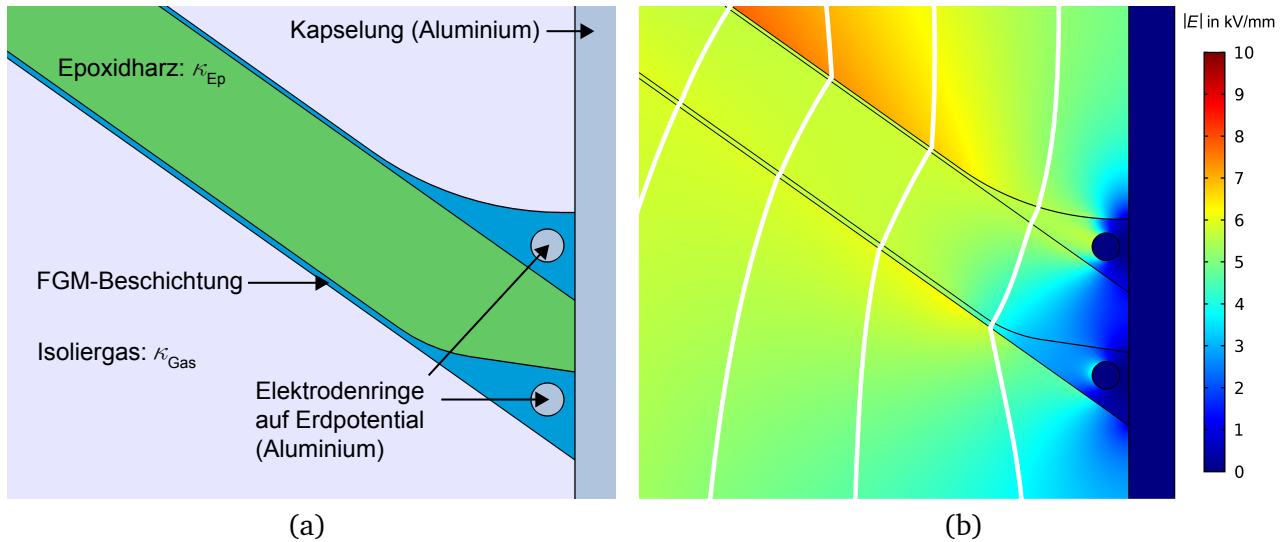
**Abbildung 4.38.:** Betrag der Feldstärke und Äquipotentiallinienverteilung des Isoliersystems mit 2 mm Beschichtung aus nichtlinearem FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.9 während einer Blitzstoßspannung, (a) im Moment des Spannungsscheitels, (b) 6  $\mu$ s nach dem Spannungsscheitel

der Tripelpunkte verdickt, zum anderen werden anstelle der Elektrode an der Kapselung zwei Elektrodenringe (auf Erdpotential) in die Feldsteuerschicht gelegt. Die sich ergebende Geometrie ist in Abbildung 4.39 (a) dargestellt. Die äußere Kontur des Isolators wird beibehalten, um einen besseren Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen.

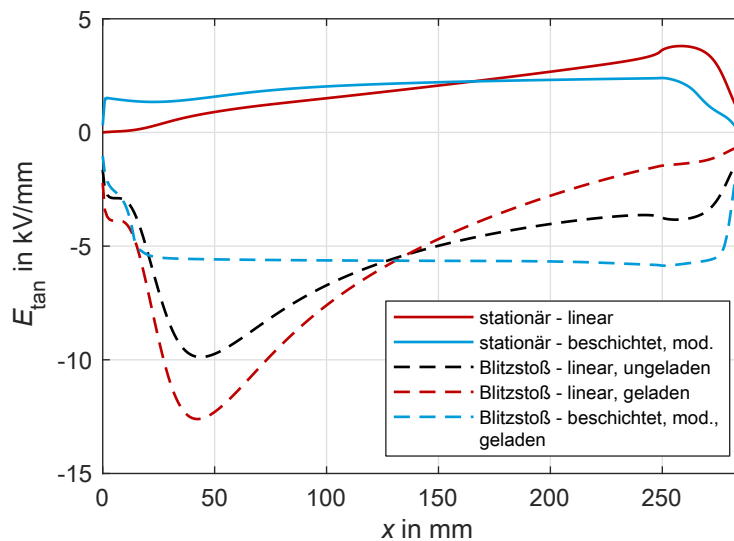
In diesem Fall wurde noch keine gezielte Optimierung der Elektrodenform und -größe durchgeführt. Trotzdem ist bereits eine deutliche Reduktion der auftretenden Feldstärken im Bereich des Tripelpunkts zu erkennen (vgl. Abbildung 4.39 (b) und Tabelle 4.4). Wie Abbildung 4.40 zu entnehmen ist, wird auch im stationären Zustand der Tripelpunkt entlastet und eine vorteilhafte Feldverteilung erzielt. Die modifizierte Geometrie wäre in der Herstellung aufwendiger als eine gleichmäßige Beschichtung. Positiv zu bewerten ist, dass auch bei dieser Geometrie zwischen Innenleiter und Kapselung eine durchgehende Struktur aus herkömmlichem Isolierstoff besteht. Auf diese Weise kann die mechanische Funktion weitestgehend von dieser übernommen werden, falls dies nötig oder gewünscht wäre.

Zusammenfassend konnte durch die in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungen gezeigt werden, dass sich bereits durch eine dünne Beschichtung mit Feldsteuermaterial der gewünschte Effekt einer Vergleichmäßigung der Feldstärke erzielen lässt. Allerdings muss das Feldsteuermaterial auch in diesem Fall auf die Geometrie hin ausgelegt werden. Im Idealfall werden Material und Form des Isolators aneinander angepasst. Obwohl im gezeigten Beispiel nur eine Designrichtlinie umgesetzt wurde – ohne dass eine vollständige Optimierung stattfand – konnte ein Ergebnis erzielt werden, welches dem Einsatz des Feldsteuermaterials als Vollmaterial überlegen ist. Dies zeigt, dass in dem gezielten Einsatz von Feldsteuerschichten und einem kreativen Designprozess des gesamten Isoliersystems ein erhebliches Potential liegt.

Die Wahl zwischen dünner Beschichtung (beispielsweise Lackierungen von mehreren 10 bis 100  $\mu$ m) und Volumenschicht (ab etwa einem Millimeter) kann auch davon abhängig sein, welche mechanischen Ansprüche an die Isolatoren gestellt werden. Dünne Lackierungen können für den späteren Einbau



**Abbildung 4.39.:** (a) Detailansicht der modifizierten Geometrie (Beschichtung aus nichtlinearem FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.9), (b) Betrag der Feldstärke und Äquipotentiallinienverteilung während der Blitzstoßspannung bei Nutzung der modifizierten Geometrie (im Moment der höchsten auftretenden Hintergrundfeldstärke im Tripelpunkt)



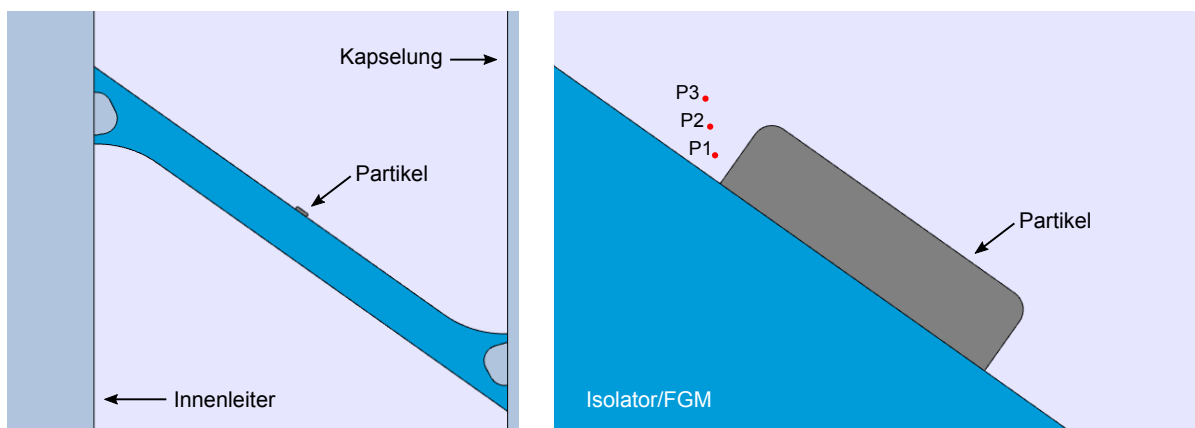
**Abbildung 4.40.:** Verteilung der Tangentialfeldstärken entlang der konvexen Seite eines Schottisolators,  $\Delta\vartheta = 30^\circ$ ;  $U_{DC} = 550$  kV;  $U_{LI} = -1550$  kV; nichtlineares FGM mit Kennlinie nach Abbildung 4.9 (schwarz: kapazitive Feldverteilung ohne Ladungsträgerakkumulation, rot: linearer Isolierstoff, blau: 1 mm dicke FGM-Beschichtung, modifizierte Geometrie)

auf der Baustelle möglicherweise zu anfällig gegenüber Kratzern oder Abplatzen sein. Wird aus diesem Grund eine Volumenschicht bevorzugt, sollte die Anpassung der Schichtdicke und der Elektrodengeometrie zum Erzielen eines besseren elektrischen Designs in Erwägung gezogen werden.

## 4.6 Steigerung der Resilienz gegenüber Fremdpartikeln

Wie bereits in Abschnitt 4.3 angedeutet wurde, bewirkt die starke Nichtlinearität der Leitfähigkeit, dass sich kurzzeitig ausreichend hohe spezifische Leitfähigkeiten einstellen, um Effekte durch angesammelte Ladungsträger zu kompensieren. Hierdurch wird die Empfindlichkeit des Isoliersystems gegenüber äußeren Einflüssen verringert. Es ist weiterhin denkbar, dass sich durch den Einsatz nichtlinearer Feldsteuermaterialien eine gesteigerte Resilienz des Isoliersystems gegenüber chaotischen Störeinflüssen erzielen lässt, was im Folgenden untersucht werden soll. Ein Beispiel für solche störenden Einflüsse stellen leitfähige Partikel dar, die etwa durch Abrieb in bewegten Teilen von Schaltanlagen entstehen können.

Die Anwesenheit von leitfähigen Partikeln auf Isolatoroberflächen kann eine Reduktion des Isoliervermögens bewirken [Her2016]. Daher kommen in gasisolierten Systemen häufig Teilchenfallen zum Einsatz, welche die Partikel in einem feldfreien Raum einfangen sollen, um ein Tanzen im Gasraum oder ein Anheften an den Isolator zu verhindern [Koc2012]. Die Ausgestaltung solcher Teilchenfallen gestaltet sich jedoch für Gleichspannungssysteme anspruchsvoller als bei Wechselspannungssystemen. Da leitfähige Teilchen in verschiedenen Formen und Größenordnungen (Späne, Staub, Abrieb, etc.) vorkommen können und ihr Auftreten nicht abschätzbar ist, werden sie während des Designprozesses eines Isoliersystems nicht direkt berücksichtigt. Stattdessen wird eine entsprechende Sicherheitsmarge vorgesehen. Allerdings ist es nicht auszuschließen, dass leitfähige Teilchen auf Isolatoroberflächen gelangen, weshalb sie in aktuellen Untersuchungen Beachtung finden [Her2016] und auch an dieser Stelle exemplarisch betrachtet werden sollen. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auf weitere Störungen der Oberfläche übertragen, wie etwa Verschmutzungen, leitfähige Beläge oder Fett.

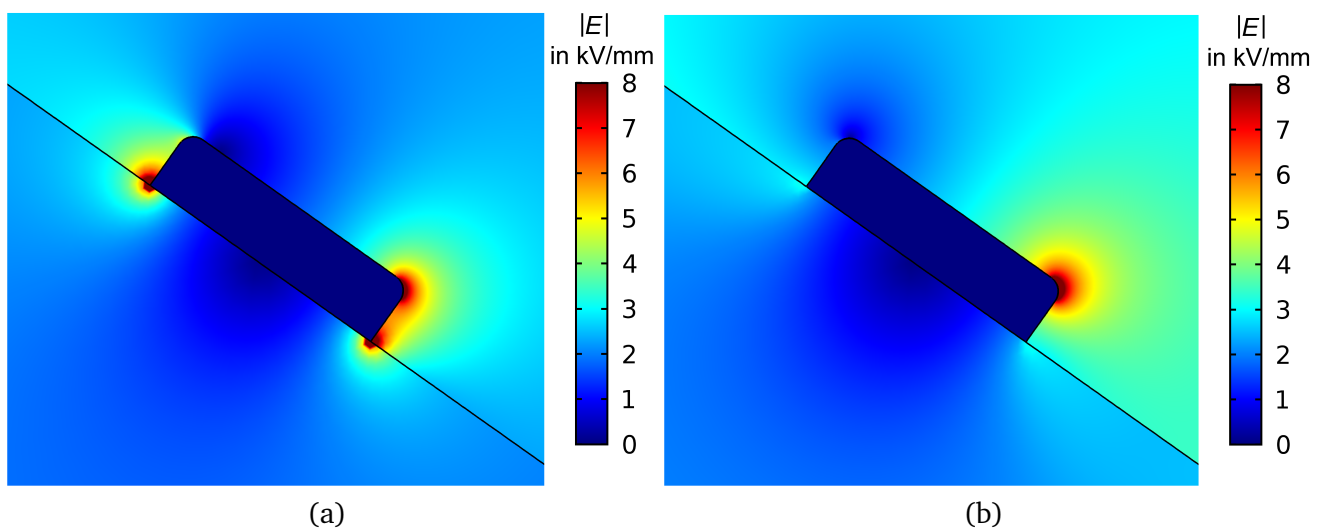


**Abbildung 4.41.:** Modellierung des Problems eines leitfähigen Partikels auf der Oberfläche, P1 bis P3: Auswertepunkte für die Hintergrundfeldstärke

Das Problem ist in Abbildung 4.41 dargestellt. Hierbei werden die in Abschnitt 4.3 betrachtete Geometrie (vgl. Abbildung 2.1) und die in Abschnitt 4.3.1 entwickelte Wunschennlinie zugrunde gelegt. Zusätzlich wird ein leitfähiges Partikel mit einer Länge von 8 mm in der Mitte der konvexen Seite des Schottisolators aufgebracht. Da es sich um eine rotationssymmetrische Modellierung handelt, wird hier tatsächlich ein leitfähiges Band um den Isolator betrachtet, was allerdings die grundlegenden Erkenntnisse der Untersuchung nicht ändert. Die Problemstellung ist mit der von Wassertropfen auf der Oberfläche von Verbundisolatoren vergleichbar [Gua2005], [Fei2009], [Naz2016]. Für diese konnte durch Simula-

tionen gezeigt werden, dass durch den Einsatz von mikrovaristorgefülltem Silikon eine Reduktion der Feldstärken im Bereich der Tripelpunkte zu erwarten ist [Ye2015].

Die stationäre Simulation für einen herkömmlichen Isolierstoff zeigt deutlich, dass es im Bereich der Tripelpunkte zwischen leitfähigem Partikel und Isolatoroberfläche zu starken Feldüberhöhungen kommt (vgl. Abbildung 4.42 (a)). In diesem Bereich sind die Voraussetzungen für die Entstehung von Oberflächenentladungen gegeben. Wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben, können jedoch die Beträge der Feldstärken direkt am Tripelpunkt nicht als aussagekräftig angesehen werden. Daher wird auch an dieser Stelle eine Betrachtung der Hintergrundfeldstärke durchgeführt, um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen zu ermöglichen. Hierzu werden die Feldstärken in 0,5 mm, 1 mm und 1,5 mm Entfernung vom Tripelpunkt ausgewertet (Auswertepunkte P1 bis P3 auf der Achsenhalbierenden zwischen Isolatoroberfläche und Partikelstirnseite, vgl. Abbildung 4.41 rechts).



**Abbildung 4.42.:** Feldverteilung um ein leitfähiges Partikel auf der Isolatoroberfläche, Skalen begrenzt auf 8 kV/mm, (a) Isolator aus herkömmlichem Isolierstoff EP1, (b) Isolator aus Feldsteuerematerial mit Kennlinie nach Abbildung 4.9

Die Feldverteilung bei Nutzung des Feldsteuermaterials mit den ermittelten Wunschparametern ist in Abbildung 4.42 (b) dargestellt. Das Partikel sorgt auch im Isolator für eine lokal erhöhte Feldstärke (vgl. Abbildung 4.42 (a)), wodurch wiederum die spezifische Leitfähigkeit des Feldsteuermaterials um das Partikel herum steigt. Auf diese Weise wird die Feldstärke um das Partikel herum vergleichmäßigt. Der Effekt erstreckt sich auch auf den Gasraum, wodurch besonders im Bereich der Tripelpunkte zwischen Partikel und Isolatoroberfläche eine Reduktion der Feldstärke erzielt wird. Der Vergleich des Absolutwertes der Hintergrundfeldstärke in den Auswertepunkten (siehe Tabelle 4.5) bestätigt dies. Die Feldstärke in Punkt 1 konnte durch den Einsatz des Feldsteuermaterials um 48,5 % gesenkt werden. Zwar tritt an der gasseitigen, rechten Kante des Partikels nun eine Erhöhung der Feldstärke um etwa 9 % gegenüber dem ungesteuerten Fall auf, allerdings ist dieser Punkt weniger kritisch als die Tripelpunkte.

Da der feldsteuernde Effekt mit einer lokalen Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit einhergeht, muss geprüft werden, dass hierdurch nicht die Gefahr eines thermischen Weglaufens des Isoliersystems entsteht. Hierzu wird die Verlustleistung im Isolator kontrolliert. Da die gesamte im Isolator umgesetzte



Verlustleistung durch die Anwesenheit des Partikels<sup>16</sup> um nur etwa 3 % erhöht wird, besteht hier kein Risiko des thermischen Weglaufens, sofern das System sinnvoll ausgelegt wurde.

**Tabelle 4.5.:** Hintergrundfeldstärken vor leitfähigem Partikel (nachgebildet durch ein leitfähiges Band)

Punkt	Feldstärke für lineares Material (in kV/mm)	Feldstärke für FGM (in kV/mm)	relative Reduktion (in %)
P1	5,11	2,63	48,5
P2	3,78	2,37	37,3
P3	3,13	2,28	27,2

Die hier gezeigten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass ein positiver Nebeneffekt des Einsatzes eines nichtlinearen Feldsteuermaterials auch die Erhöhung der Resilienz des Isoliersystems gegenüber leitfähigen Partikeln auf der Isolatoroberfläche darstellt. Dies gewinnt besonders unter dem Gesichtspunkt an Bedeutung, dass beim Einbau der Isolatoren keine Laborbedingungen vorherrschen und die Beeinträchtigung der Oberfläche durch Fremdschichten und Partikel nicht ausgeschlossen werden kann.

<sup>16</sup> Genau genommen ist dies der Effekt des leitfähigen Bandes. Der Einfluss durch ein einzelnes Partikel wäre noch deutlich geringer.



---

## 5 Untersuchte Füll- und Verbundstoffe

Im Rahmen dieser Arbeit sollen mögliche Kandidaten für zukünftige Feldsteuermaterialien zum Einsatz in Hochspannungsisoliersystemen für Gleichspannungen identifiziert werden. Die hierzu eigens hergestellten Prüflinge werden in diesem Kapitel beschrieben. Dabei handelt es sich um zwei wesentliche Arten von Prüflingen: Zum einen werden Verbundstoffprüflinge aus gefülltem Epoxidharzformstoff untersucht, zum anderen werden auch Messungen direkt an Füllstoffen durchgeführt. Die direkt vermessenen Füllstoffproben werden hier als *Pulverprüflinge* bezeichnet. Während Verbundstoffprüflinge die Untersuchung bei betriebsrelevanten Feldstärken erlauben, lassen sich Pulverprüflinge schneller herstellen und ermöglichen damit ein frühes Bewerten und Vorsortieren der infrage kommenden Füllstoffe.

Im Folgenden werden zuerst die zur Verfügung gestellten Füllstoffe vorgestellt und anschließend auf die Herstellung beziehungsweise Präparation und die Konditionierung der Prüflinge eingegangen.

---

### 5.1 Übersicht über die untersuchten Füllstoffe

---

Die untersuchten Füllstoffe sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Dabei handelt es sich sowohl um zwei Vertreter der Klasse der Mikrovaristoren, die von der ABB Schweiz AG zur Verfügung gestellt wurden, als auch um eine große Anzahl an substratbasierten Füllstoffen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Zweitere wurden allesamt von der Firma Merck als Prototypen zur Verfügung gestellt und stellen eine Weiterentwicklung der Iriotec<sup>®</sup>-Serie dar<sup>1</sup>. Gemeinsam haben alle der hier vorgestellten Füllstoffe, dass es sich um funktionelle, pulverförmige Füllstoffe handelt. Dies bedeutet, dass die elektrischen Eigenschaften auf die intrinsischen Eigenschaften der einzelnen Füllstoffpartikel zurückzuführen sind (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Mit den verschiedenen Varianten der substratbasierten Füllstoffe wurden unterschiedliche Ziele verfolgt, wie etwa Verbesserungen der Verarbeitbarkeit oder der elektrischen Eigenschaften. So wurde beispielsweise die Form der Füllstoffpartikel mehrfach angepasst, um das Einmischen in Epoxidharz zu erleichtern. Auf diese Entwicklungsschritte und die erzielten Ergebnisse wird im Rahmen der Diskussion in Abschnitt 6.3 genauer eingegangen. Auch Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Füllstoffe finden sich in diesem Abschnitt sowie in den Grundlagen wieder (siehe Abschnitt 2.2.2).

Die Beschreibung des Aufbaus der Füllstoffpartikel in Tabelle 5.1 ist der Übersicht halber vereinfacht. Die diversen Metalloxide werden immer in Kombination mit Dotierstoffen eingesetzt, wie bereits in den Grundlagen beschrieben (vgl. Abschnitt 2.2.2). Auf eine Nennung dieses Umstandes in der Tabelle wird daher verzichtet. Die genutzten Ausgangsmaterialien für Substrate und Beschichtungen sind soweit angegeben, wie dies unter Wahrung von Betriebsgeheimnissen möglich ist.

Neben den Füllstoffen und den daraus hergestellten Verbundstoffen wurde auch ein nicht-funktionell gefüllter Epoxidharzformstoff untersucht. Dieser enthält einen Füllstoff, der lediglich der Reduktion des Schrumpfes während der Aushärtung und der Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit dient. Dieser Verbundstoff dient als Referenzmaterial und wird mit dem Namen EP1 bezeichnet.

---

<sup>1</sup> Diese Serie von Füllstoffpartikeln wurde ursprünglich unter dem Produktamen Minatec<sup>®</sup> geführt (vgl. [Ten2015]).

Tabelle 5.1.: Übersicht über die untersuchten Füllstoffe			
Füllstoffname	Aufbau des Füllstoffes	Form	Besonderheiten
Mikrovaristoren Variante a	gesintertes Zinkoxid	sphärisch	Anwendung in Kabelgarnituren (mittlerer Schaltbereich)
Mikrovaristoren Variante b	gesintertes Zinkoxid	sphärisch	Anwendung in Kabelgarnituren (niedriger Schaltbereich)
MF2	Glimmer mit Titandioxidbeschichtung	planar	Silanisierung der Oberfläche
E12b	Glimmer mit Zinnoxidbeschichtung	planar	thermisch nachbehandelt
E14b	Glimmer mit Titandioxidbeschichtung	planar	
M-b-5	unregelmäßiges Substrat mit Titanoxidbeschichtung	unregelmäßig	
M-b-05	unregelmäßiges Substrat mit Titanoxidbeschichtung	unregelmäßig	
M-b-005	unregelmäßiges Substrat mit Titanoxidbeschichtung	unregelmäßig	
M-b-27	sphärisches Substrat mit Metalloxidbeschichtung	sphärisch	Haftvermittler zwischen Substrat und Beschichtung
M-c-7	Aluminiumoxidplättchen mit Zinnoxidbeschichtung	planar	
M-c-9	Aluminiumoxidplättchen mit Zinnoxidbeschichtung	planar	
M-d-33	sphärisches Substrat mit Zinnoxidbeschichtung	sphärisch	
M-e-26	sphärisches Substrat mit Zinnoxidbeschichtung	sphärisch	Haftvermittler zwischen Substrat und Beschichtung
M-f-37	sphärisches Substrat mit Titanoxidbeschichtung	sphärisch	modifizierter Haftvermittler zwischen Substrat und Beschichtung
M-g-34	sphärisches Substrat mit Metalloxidbeschichtung	sphärisch	modifizierter Haftvermittler zwischen Substrat und Beschichtung
M-g-44	sphärisches Substrat mit Titanoxidbeschichtung	sphärisch	modifizierter Haftvermittler zwischen Substrat und Beschichtung

## 5.2 Herstellung und Präparation von Verbundstoffprüflingen

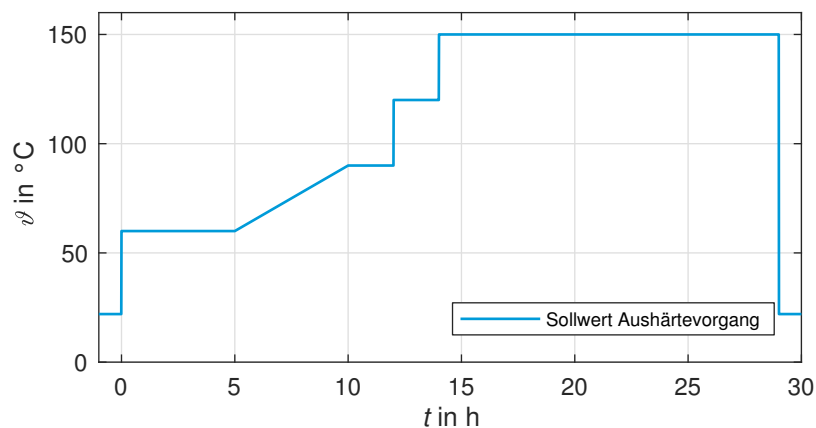
Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Füllstoffe liegen als Rohmaterial allesamt in Pulverform vor. Erst durch das Einmischen in ein Polymer entsteht ein Verbundstoff, der potentiell ein anwendbares Feldsteuermaterial darstellt. Da der Fokus dieser Arbeit auf Feldsteuermaterialien für gasisierte Systeme liegt, werden nur Verbundstoffe auf Basis einer Epoxidharzmatrix betrachtet. Diese stellen eine ausreichende mechanische Stabilität bereit, um als stützende Struktur im Isoliersystem zu dienen.

Die hier untersuchten Füllstoffpartikel weisen unterschiedliche Formen und Aspektverhältnisse auf und unterscheiden sich weiterhin in Größe und Dichte. Speziell bei nicht-sphärischen Füllstoffpartikeln kann ein Einfüllen oberhalb der Perkolationsschwelle dazu führen, dass die unvernetzte Mischung aus Epoxidharz und Füllstoff schwer vergieß- und verarbeitbar wird. Um dies zu kompensieren, wurde ein besonders niederviskoses Epoxidharz gewählt ( $\eta_{Ep} = 42 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  bei  $57^\circ\text{C}$ ). Die Zusammensetzung der hier genutzten Standardrezeptur ist in Tabelle 5.2 angegeben. Diese bezieht sich nur auf den Epoxidharzanteil. Die Füllstoffe werden je nach Dichte und Ziel der Untersuchung in variierender Konzentration zugegeben. Um ein Sedimentieren von besonders dichten Füllstoffpartikeln zu verhindern, wird dem Epoxidharz ein Beschleuniger hinzugegeben. Auf diese Weise startet der Vernetzungsprozess früher.

**Tabelle 5.2.: Rezeptur Epoxidharzmasse**

Komponente	Typ	Gewichtsanteil (in %)
Harz	Momentive EPIKOTE™ Resin 162	49,95
Härter	Momentive EPIKURE™ Curing Agent 868	49,95
Beschleuniger	Momentive EPIKURE™ Catalyst 100	0,1

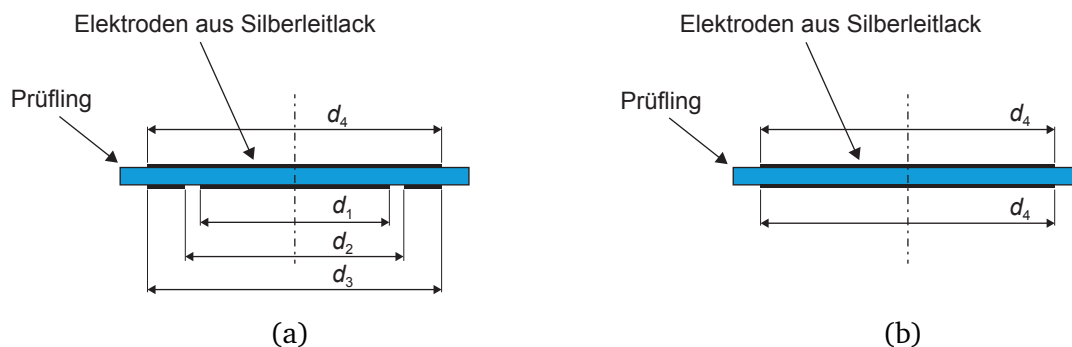
Vor dem Vermischen werden alle Komponenten (mit Ausnahme des Beschleunigers) für mindestens zwölf Stunden getrocknet, Harz und Härter bei  $60^\circ\text{C}$ , der Füllstoff bei  $130^\circ\text{C}$ . Die Komponenten werden bei  $60^\circ\text{C}$  vermischt. Anschließend wird das Gemisch unter Vakuum ( $10 \text{ mbar(a)}$ ) in eine zylindrische Form ( $d_{\text{Pruefling}} = 45 \text{ mm}$ ) gegossen, um die Bildung von Lufteinschlüssen zu verhindern.



**Abbildung 5.1.:** Sollwertkurve für den gesteuerten Trockenofen zur Erzielung einer kontrollierten Vernetzung des Epoxidharzes

Der Aushärtetvorgang findet in einem steuerbaren Trockenofen statt, in dem das in Abbildung 5.1 dargestellte Temperaturprofil nachgefahren wird. Auf diese Weise läuft die exotherme Vernetzungsreaktion kontrolliert ab.

Nach dem Abkühlen werden aus den zylinderförmigen Rohlingen die eigentlichen Prüflinge in Scheibenform abgetrennt. Je nach geplanter Prüfung wird eine Höhe zwischen 2 und 3 mm gewählt.



**Abbildung 5.2.:** Elektrodenanordnungen für Verbundstoffprüflinge mit Maßen nach IEC 60093<sup>2</sup>, (a) Drei-Elektrodenanordnung mit Schutzring, nach [IEC60093], (b) Zwei-Elektrodenanordnung

Um eine gute Kontaktierung für die elektrische Charakterisierung zu gewährleisten, werden Elektrodenanordnungen aus Silberleitlack aufgebracht. Je nachdem, ob die Prüflinge für Messungen mit Impulsspannungen oder für Gleichspannungsmessungen eingesetzt werden sollen, wird eine Anordnung aus zwei Elektroden oder eine Anordnung aus drei Elektroden gewählt. Die beiden Anordnungen sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Drei-Elektroden-Anordnung beinhaltet einen sogenannten *Schutzring* oder *Schirmleiter*, wie in DIN EN 62631-3-1 vorgeschlagen [DIN62631-3-1]. Die Dimensionen der Anordnungen sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst<sup>2</sup>. Die Schutzringanordnung bildet einen Bypass für Ströme, die entlang der Oberfläche von Prüflingen fließen und die Messung von geringen spezifischen Volumenleitfähigkeiten stören würden. Bei Messungen mit Impulsspannungen ist davon auszugehen, dass sich Volumenleitfähigkeiten einstellen, die mehrere Größenordnungen über der Oberflächenleitfähigkeit liegen, wodurch der Einfluss von Oberflächenströmen vernachlässigbar wird. Daher kann für diese Messungen eine einfachere Elektrodenanordnung mit nur zwei Elektroden genutzt werden (siehe Abbildung 5.2 (b)).

**Tabelle 5.3.:** Elektrodengeometrie Verbundstoffprüflinge

Maß nach IEC 60093 <sup>2</sup>	Durchmesser (in mm)
$d_1$	20
$d_2$	24
$d_3$	31
$d_4$	31

Nach dem Trocknen des Silberleitlacks werden die Verbundstoffprüflinge in einem Exsikkator bei einer relativen Luftfeuchte von unter 15 % (bei Raumtemperatur) gelagert. Vor der endgültigen Konditio-

<sup>2</sup> Die Maßangaben beziehen sich auf die ältere, zurückgezogene Norm IEC 60093, da die entsprechende Abbildung nicht in die neuere DIN EN 62631-3-1 übernommen wurde.

nierung werden sie zudem einem Trocknungsvorgang in einem Vakuumofen unterzogen ( $\vartheta = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p < 1\text{ mbar(a)}$ , mindestens zwölf Stunden).

### 5.3 Präparation von pulverförmigen Prüflingen

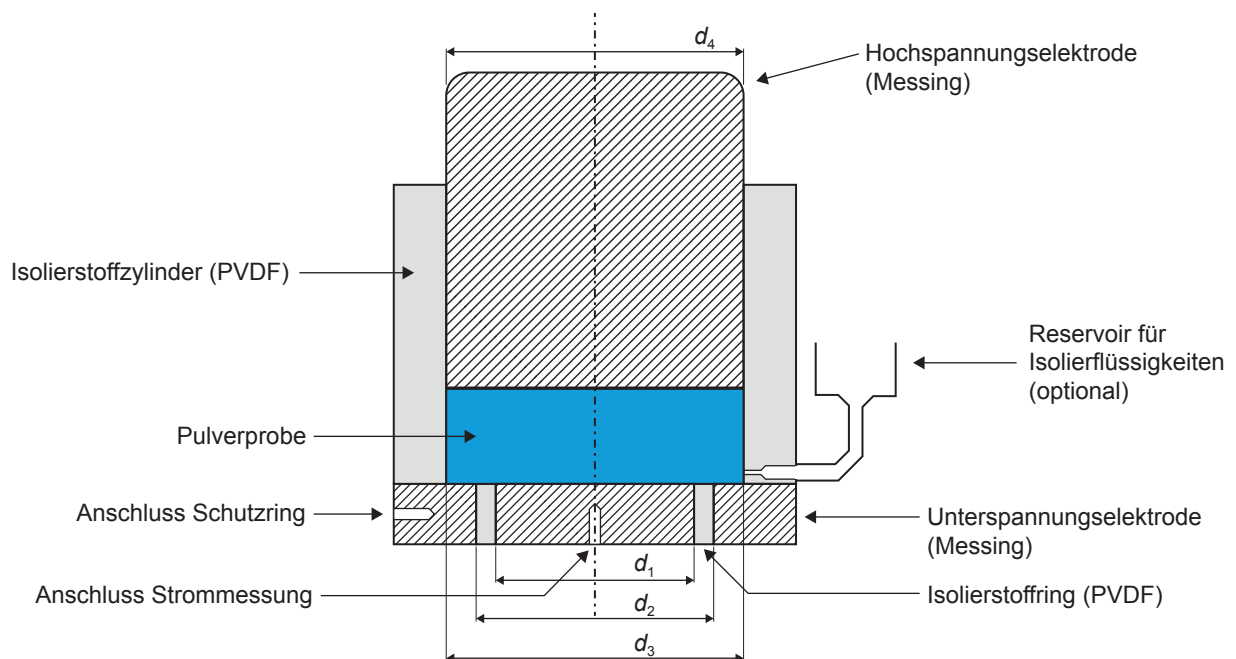
Um die direkte elektrische Charakterisierung von Füllstoffen in Pulverform zu ermöglichen, wurde eine Pulvermesszelle (kurz: PMZ) entwickelt. Diese ist schematisch in Abbildung 5.3 dargestellt.

Die Hochspannungselektrode (Masse:  $m_{\text{El1}} = 1128\text{ g}$ ) wird nach dem Einfüllen des Pulvers aufgesetzt, um einen definierten Anpressdruck zu erzeugen.

Die Unterseite wird durch eine Schutzringanordnung, vergleichbar mit der für Verbundstoffprüflinge, gebildet. Kriechströme entlang des Isolierstoffzylinders aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) werden durch die Schutzelektrode abgeführt, ohne die Messung zu beeinflussen. Die Maße der Elektrodenanordnung sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Eine Bohrung im unteren Bereich des Isolierstoffzylinders erlaubt den Anschluss eines Reservoirs für Isolierflüssigkeiten. Wird das Reservoir mit einer ausreichend niederviskosen Isolierflüssigkeit gefüllt, saugen die Kapillarkräfte die Flüssigkeit durch den Pulverprüfling. Hierdurch werden die Luft aus dem Pulverprüfling verdrängt und Teilentladungen vermieden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zu diesem Zweck die beiden Silikonöle Wacker® AK 5 und Wacker® AK 10 eingesetzt (Datenblätter: siehe Anhang A.3). Soll die Pulverprobe *trocken*, also ohne den Einsatz von Isolierflüssigkeiten, untersucht werden, lässt sich die Bohrung durch eine Blindschraube abdichten.

Weiterhin ist in die Hochspannungselektrode eine Skala integriert, um die Füllhöhe des Pulvers direkt ablesen zu können.



**Abbildung 5.3.:** Schematische Darstellung der Messzelle für die Untersuchung von pulverförmigen Prüflingen



**Tabelle 5.4.: Elektrodengeometrie Pulvermesszelle**

Maß nach IEC 60093	Durchmesser (in mm)
$d_1$	30
$d_2$	36
$d_3$	50
$d_4$	50

Vor der Präparation eines Pulverprüflings wird die Elektrodenanordnung mit Isopropanol gereinigt. Die zu untersuchenden Pulverproben werden für mindestens zwölf Stunden bei 105 °C und einem absoluten Druck von < 1 mbar getrocknet. Nach dem Trocknungsvorgang wird das Pulver in kreisenden Bewegungen gleichmäßig in die Pulvermesszelle gefüllt. Vor dem Aufsetzen der Hochspannungselektrode werden händisch *Kompaktierungsstöße* durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Pulvermesszelle über eine definierte Höhe frei fallen gelassen wird (vgl. [Mül2012]). Der Vorgang wird je Prüfling zehnmal durchgeführt und darauf geachtet, dass die Pulveroberfläche eben und waagrecht ausfällt.

Ein Ziel der Arbeit ist es, herauszufinden, ob sich Pulverprüflinge kompaktieren lassen und ob die potentielle Kompaktierung einen Einfluss auf die gemessene spezifische Leitfähigkeit des Pulvers ausüben kann (vgl. Abschnitt 6.1.2 und [Mül2012]). Zu diesem Zweck wird die Pulvermesszelle auf einen Rütteltisch gegeben, mit dessen Hilfe eine reproduzierbare Verdichtungsprozedur durchgeführt werden kann (3000 rpm;  $\approx 130 \mu\text{m}$  vertikale Amplitude). Das höchste Maß an Kompaktierung kann festgestellt werden, wenn während dieses Vorgangs die Hochspannungselektrode bereits auf dem Pulver aufgesetzt ist. Am Mikrovaristorpulver der Variante a lässt sich so nach zwei Minuten eine Kompaktierung von etwa 10 % erzielen<sup>3</sup>. Eine Verlängerung der Kompaktierungsphase über die zwei Minuten hinaus bewirkt keinen messbaren Effekt.

Wird der Pulverprüfling unter Zuhilfenahme einer Isolierflüssigkeit untersucht, wird diese nach der Präparation, aber kurz vor dem Konditionierungsvorgang hinzugegeben.

---

## 5.4 Konditionierung

---

Vor der eigentlichen Charakterisierung mit Gleichspannung werden sowohl Verbundstoff- als auch Pulverprüflinge einem Konditionierungsvorgang unterzogen. Hierzu wird der Prüfling inklusive der Elektrodenanordnung für mindestens fünf Stunden bei den Zielbedingungen der bevorstehenden Messung gelagert. Diese Lagerung findet im Klimaschrank des Versuchstandes statt (vgl. Anhang A.1).

Für die Messungen mit Impulsspannung wird die hier beschriebene Konditionierung nicht durchgeführt, da im Durchbruchbereich der Kennlinie von einer weniger stark ausgeprägten Temperaturabhängigkeit ausgegangen wird (vgl. Abschnitt 6.2.1). Auch andere Störeinflüsse wirken sich bei den erreichten spezifischen Leitfähigkeiten und Stromamplituden nicht signifikant aus.

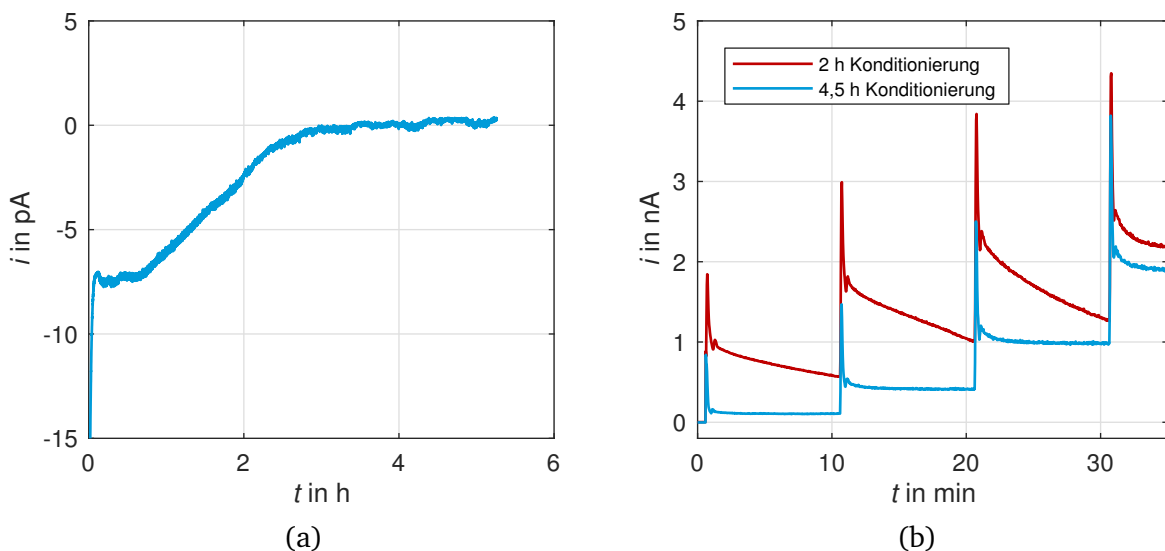
Die Konditionierungsphase dient mehreren Zielen: einerseits dem Aufladen aller thermischen Kapazitäten, inklusive der der Elektroden. Hierdurch wird vermieden, dass durch ein verzögertes Aufheizen des

---

<sup>3</sup> Gemeint ist damit die Reduktion der Füllhöhe bezogen auf die Füllhöhe vor der Behandlung auf dem Rütteltisch, aber nach dem Applizieren der händischen Kompaktierungsstöße.

Prüflings eine Zeitabhängigkeit im gemessenen Strom erzeugt wird, die bei gleichbleibender Temperatur nicht vorhanden wäre. Andererseits wird sichergestellt, dass sich ein Feuchtgleichgewicht des Prüflings mit seiner Umgebung einstellt. Für diese Anforderung sind fünf Stunden eine vergleichsweise kurze Dauer. Im Rahmen dieser Arbeit werden allerdings nur Pulverprüflinge oder hochgefüllte Verbundstoffe untersucht. Diese erlauben ein vergleichsweise rasches Eindringen (oder Austreten) der Wassermoleküle entlang der Grenzflächen der Füllstoffpartikel. Die Entwicklung von Luftfeuchte und Temperatur wird während des Konditionierungsvorgangs überwacht.

Weiterhin wird der Prüfling während der Konditionierung auch elektrisch entladen. Für die Dauer der Konditionierung werden die Prüflinge kurzgeschlossen, das Messgerät zur Erfassung des Stroms jedoch im Stromkreis belassen. Auf diese Weise kann festgestellt werden, ob sich zum Beispiel *thermisch stimulierte Depolarisationsströme* einstellen, was besonders bei vorbelasteten Prüflingen möglich ist [Kao2004]. Solange diese oder anderweitig verursachte Ströme eine nicht-tolerierbare Größenordnung in Relation zum erwarteten Messwert annehmen, wird vom Start der Prüfung abgesehen. In DIN EN 62631-3-1 wird vorgegeben, dass der so ermittelte Kurzschlussstrom vor Beginn der Messung einen nahezu konstanten Wert erreichen muss [DIN62631-3-1].



**Abbildung 5.4.:** (a) Stromverlauf während des Konditionierungsvorgangs eines Pulverprüflings (Mikrovaristoren Variante a), (b) Vergleich des Stromverlaufs eines zu kurz konditionierten Pulverprüflings (rot) mit dem eines für 4,5 h konditionierten Pulverprüflings (blau),  $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $RH \approx 3\%$ ;  $U = 0 \dots 2000\text{ V}$ , nach [Sec2017b]

Ein Beispiel für einen während der Konditionierungsphase gemessenen Kurzschlussstrom ist in Abbildung 5.4 (a) dargestellt. Dabei handelt es sich um den Strom durch einen Pulverprüfling, der für eine Messung bei  $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $RH \approx 3\%$  konditioniert wurde. Da der Prüfling nicht vorbelastet war und die Temperatur nahe an der Raumtemperatur lag, war nicht mit einem signifikanten thermisch stimulierten Depolarisationsstrom zu rechnen. Trotzdem konnte ein Strom mit einem Betrag von mehr als  $5\text{ pA}$  gemessen werden, der erst nach etwa drei Stunden vollständig abgeklungen war.

Der Strom während der Konditionierungsphase ist dabei nicht nur als ein Fehlerstrom zu sehen, der sich dem zu messenden Strom überlagert. Vielmehr dient er auch als Indikator für nicht abgeschlosse-

---

ne Ausgleichsvorgänge. Abbildung 5.4 (b) zeigt das Ergebnis des Versuchs, die Konditionierungszeit zu verkürzen. Durchgeführt wurde hier jeweils eine Kennlinienaufnahme an einem Mikrovaristorpulver, in deren Verlauf die Spannung alle zehn Minuten gesteigert wurde<sup>4</sup>. Die beiden Pulverprüflinge entstammen der selben Charge und wurden abgesehen von der Konditionierungsdauer auf die gleiche Weise vorbereitet. Da der Absolutwert des Stroms während der Konditionierungsphase nach 2 h bereits unter 3 pA lag, was relativ zu den etwa 100 pA des erwarteten Messwertes bei der ersten Spannungsstufe als vertretbarer Offset angesehen werden kann, wurde die Konditionierung an dieser Stelle beendet. Allerdings stellte sich in der Folge ein im Vergleich zum 4,5 h konditionierten Prüfling deutlich abweichender Stromverlauf ein. Speziell für die Messpunkte bei geringen Feldstärken unterscheiden sich sowohl der zeitliche Verlauf als auch der nach zehn Minuten gemessene Wert des Stroms, der in die Kennlinie eingehen soll. Bei Versuchen mit einer Konditionierungsdauer von mehr als 4,5 h konnte jedoch keine weitere Veränderung der Wirksamkeit der Konditionierung festgestellt werden. Auf Basis dieser Voruntersuchung wurde beschlossen, die Mindestdauer der Konditionierung zu 5 h festzulegen und zusätzlich den Strom während der Konditionierungsphase zu kontrollieren.

---

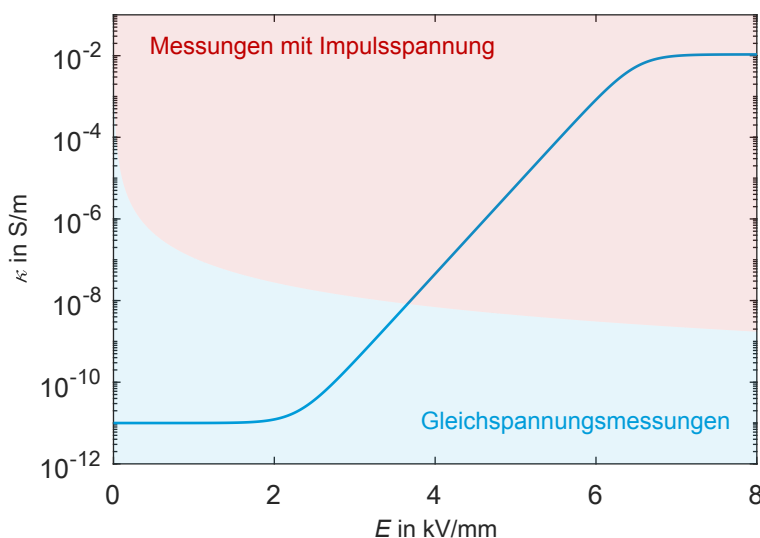
<sup>4</sup> Für diese Vormessung wurde der Gleichspannungsversuchsstand in Variante 1 eingesetzt, der über eine langsamere Spannungsregelung verfügt. Die resultierenden Überschwinger in der Prüfspannung sind die Ursache der deutlichen Überschwinger in der Strommessung.

## 6 Charakterisierung von Feldsteuermaterialien

Nachdem in Kapitel 4 die Frage beantwortet wurde, welche Parameter bei der Auslegung eines Feldsteuermaterials betrachtet werden müssen, soll nun zusammengefasst werden, wie diese Größen messtechnisch ermittelt werden können. Neben der Entwicklung der Methodik sollen auch bereits erhältliche oder sich im Prototypenstadium befindliche Feldsteuermaterialien konkret auf ihre Eignung zum Einsatz in Hochspannungsisoliersystemen für Gleichspannungen hin untersucht werden.

Das Ziel der Messungen an einem Feldsteuermaterial für den Einsatz in Gleichspannungsisoliersystemen muss es sein, eine resistive Kennlinie zu ermitteln, um diese entweder potentiellen Kunden weitergeben zu können, oder um als Isoliersystemdesigner zu kontrollieren, ob diese in den definierten Auslegungsspielraum gelegt werden kann (vgl. Abschnitt 4.3.5).

Die Messmethoden sollten dabei an die in der Anwendung auftretenden Belastungen des Materials angelehnt werden. So ist es sinnvoll, den stark nichtlinearen Bereich der Kennlinie mit impulsförmigen Spannungen zu prüfen, um eine signifikante Eigenerwärmung der Prüflinge zu vermeiden. Der Bereich der Kennlinie bis zum Erreichen der Schaltfeldstärke bzw. etwas darüber hinaus kann typischerweise mit Gleichspannungsmessungen charakterisiert werden. Abbildung 6.1 zeigt die Einsatzgebiete der durchzuführenden Messungen in der  $\kappa$ - $E$ -Ebene am Beispiel der in Abschnitt 4.3 entwickelten Kennlinie. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die während einer Gleichspannungsmessung zulässige Belastungsgrenze bei einer Verlustleistung von 250 mW in einem Verbundstoffprüfling mit 31 mm Durchmesser und 3 mm Höhe gezogen, was einer spezifischen Verlustleistung von 0,11 W/cm<sup>3</sup> entspricht. Unter dieser Bedingung war die Aufzeichnung von Datenpunkten möglich, sofern eine ausreichend kurze Messdauer gewählt wurde (vgl. hierzu den Unterabschnitt *Kurzzeitmessungen* in Abschnitt 6.1.1).



**Abbildung 6.1.:** Einsatzgebiete der beiden Messmethoden in der  $\kappa$ - $E$ -Ebene

---

Auf eine Bestimmung der Permittivität mittels elektrischer Spektroskopie wird hier verzichtet. Diese kann ergänzend zu den im Folgenden aufgeführten Charakterisierungsmethoden durchgeführt werden, ist allerdings nicht zwingend notwendig. Die Permittivität von Feldsteuermaterialien für Gleichspannungsanwendungen ist nur für die Feldstärken von Interesse, die sich bei Blitz- und Schaltstoßspannungen ergeben. Diese liegen über den Feldstärken, die sich mit typischen Impedanzanalysatoren erzeugen lassen. Stattdessen können die nötigen Informationen aus den Messungen mit Impulsspannungen gewonnen werden (siehe Abschnitt 6.2).

Die charakterisierenden Messungen wurden an Füllstoffen in Pulverform und an Verbundstoffprüflingen durchgeführt. Diese Untersuchungen dienen zwei grundlegend unterschiedlichen Zwecken: In einem Isoliersystem kommen schlussendlich immer Feldsteuermaterialien in Form von Verbundstoffen zum Einsatz. Daher ist die Kenntnis der Materialeigenschaften des fertigen Verbundstoffes für den Designprozess von Isoliersystemen nicht ersetzbar. Die Ermittlung der Eigenschaften der zur Herstellung der Feldsteuermaterialien genutzten Füllstoffe soll in erster Linie der schnellen Einschätzung dienen, beispielsweise um eine grobe Vorauswahl zu treffen oder die Entwicklung zu beschleunigen. Durch die Messungen an Füllstoffen und daraus hergestellten Verbundstoffen soll zudem der Frage nachgegangen werden, ob sich die elektrischen Eigenschaften eines Verbundstoffes aus denen des Füllstoffes ableiten lassen.

Alle der im Folgenden gezeigten Messungen wurden mit dem Ziel der Bestimmung der Eigenschaften des Prüflingvolumens durchgeführt. Die spezifische Oberflächenleitfähigkeit ist zum einen ein umfangreiches und eigenständiges Themengebiet. Zum anderen weisen Feldsteuermaterialien idealerweise spezifische Volumenleitfähigkeiten in einer Größenordnung auf, die den Einfluss der Leitungsmechanismen entlang von Oberflächen (vgl. Abschnitt 2.1.4) vernachlässigbar werden lassen.

---

## 6.1 Messungen mit Gleichspannung

---

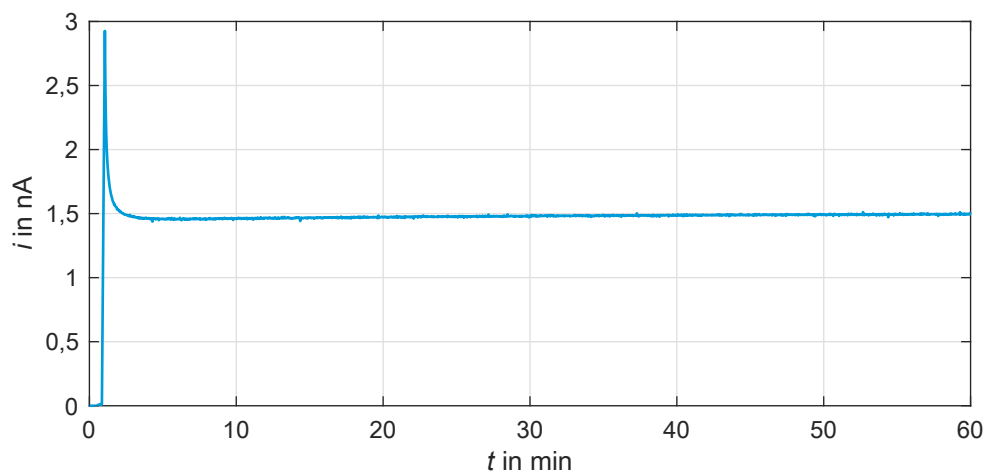
Die Ermittlung der spezifischen Leitfähigkeit von Feldsteuermaterialien bis in den Bereich der Betriebsfeldstärke  $E_N$  ist elementar, um das Material für den Einsatz zu empfehlen oder zu verwerfen (vgl. Unterkapitel 4.2). Für die Ermittlung von Gleichstromleitfähigkeiten kann nicht auf eine allgemeingültige Prozedur zurückgegriffen werden, da das große Spektrum an erzielbaren spezifischen Leitfähigkeiten dazu führt, dass die Dauer zur Ermittlung einer stationären spezifischen Leitfähigkeit stark variieren kann (vgl. Abschnitt 2.1.2). So wird ein leicht unterperkolativ gefülltes Feldsteuermaterial bereits eine erhöhte spezifische Leitfähigkeit gegenüber einem ungefüllten Isolierstoff zeigen, aber immer noch eine Polarisationsdauer von mehreren Tagen aufweisen. Ein überperkolativ gefüllter Verbundstoff mit einem Füllstoff, dessen spezifische Leitfähigkeit sich oberhalb von  $10^{-12}$  S/m bewegt, kann dagegen innerhalb von wenigen Minuten einen stationären Zustand erreichen. Weiterhin zeigen einige Isolierstoffe ein zeitabhängiges Verhalten des gemessenen Stromes, dass sich bisher durch keinen der bekannten Polarisationsmechanismen erklären lässt. Daher sollte der erste Schritt bei der Ermittlung der Gleichspannungsleitfähigkeit immer eine Messung über einen längeren Zeitraum sein. Auf dieser Basis kann die Messmethodik für den vorliegenden Prüfling gewählt werden.

Neben der Messdauer, die notwendig ist, um einen stationären Zustand zu erreichen, ist die Spannweite der sich ergebenden Stromhöhen je nach untersuchtem Prüfling sehr ausgeprägt. Der Versuchsstand zur Ermittlung der Kennlinien über einen weiten Bereich wird in Anhang A.1 beschrieben.

Die Messungen mit Gleichspannung werden, wenn nicht anders angegeben, immer bei möglichst trockenen Bedingungen durchgeführt, da die Materialien mit dem Blick auf den Einsatz in gasisolierten Systemen hin untersucht werden sollen. Durch den Einsatz von Trockenmittel (8-Å-Molekularsieb) kann in der Prüfkammer ein Taupunkt von weniger als  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (bei einer Prüftemperatur von  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) erzielt werden, was einer relativen Luftfeuchte von  $< 3\%$  entspricht.

### 6.1.1 Messungen an Verbundstoffprüflingen

Der vorbereitete Prüfling (vgl. Kapitel 5) wird zuerst im Charakterisierungsversuchsstand konditioniert und anschließend eine konstante Spannung angelegt. Der Stromverlauf wird über den gesamten Zeitraum von Konditionierung und eigentlicher Messung aufgezeichnet. Anhand des Verlaufs wird unterschieden, ob die weitere Charakterisierung mittels kurzer Messungen über einige wenige Minuten durchgeführt werden kann, oder ob für einen einzelnen Messpunkt mehrere Stunden bis hin zu Tagen investiert werden müssen. Trifft ersteres zu, kann schnell eine  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie über den gesamten Betriebsbereich von Interesse erstellt werden, während im zweiten Fall auf eine geringere Anzahl von Messpunkten gesetzt wird.

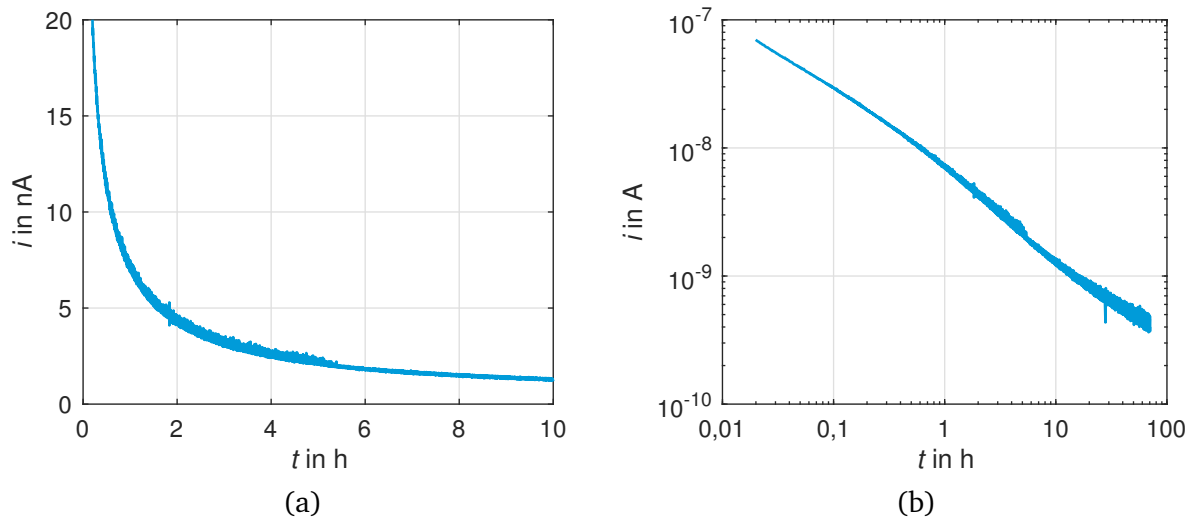


**Abbildung 6.2.:** Ausschnitt aus der Vormessung an einem Mikrovaristorverbundstoff über einen Zeitraum von 12 h, gezeigt ist die erste Stunde,  $U = 400\text{ V}$ ;  $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

In Abbildung 6.2 ist der Stromverlauf eines mikrovaristorgefüllten Epoxidharzes (Variante b) gezeigt, der bereits nach kurzer Zeit einen stationären Zustand erreicht. Bereits zwei Minuten nach Anlegen der Spannung stellt sich ein Strom ein, der nur 5 % vom stationären Wert abweicht<sup>1</sup>. Die Prüflinge dieser Serie können entsprechend in Kurzzeitmessungen untersucht werden.

Der in Abbildung 6.3 dargestellte Stromverlauf wurde an einem E12b-Verbundstoffprüfling gemessen. Ähnlich wie im Beispiel des mikrovaristorgefüllten Epoxidharzes fließt anfangs ein vergleichsweise hoher Strom durch den Prüfling. Allerdings dauern die Polarisationsvorgänge deutlich länger an, was in der doppellogarithmischen Darstellung des Stroms über der Zeit gut erkennbar ist. Für die weitere

<sup>1</sup> Diese Zeit lässt sich möglicherweise auf die Grenzflächenpolarisation der mikroskopischen Grenzen innerhalb der Verbundstoffe zurückführen. Weiterhin treten in Metalloxidvaristoren selbst Polarisations- und Formierungseffekte auf [She1991], [Rei2008].



**Abbildung 6.3.:** Stromverlauf einer Messung an einem E12b-Verbundstoffprüfling, bei der sich im betrachteten Zeitraum kein stationärer Zustand einstellte, (a) lineare Darstellung (Ausschnitt), (b) doppellogarithmische Darstellung, nach [Hus2015\*]

Untersuchung dieses Prüflings wurde beschlossen, Langzeitmessungen durchzuführen und nur wenige Messpunkte im relevanten Betriebsbereich anzufahren.

### Kurzzeitmessungen

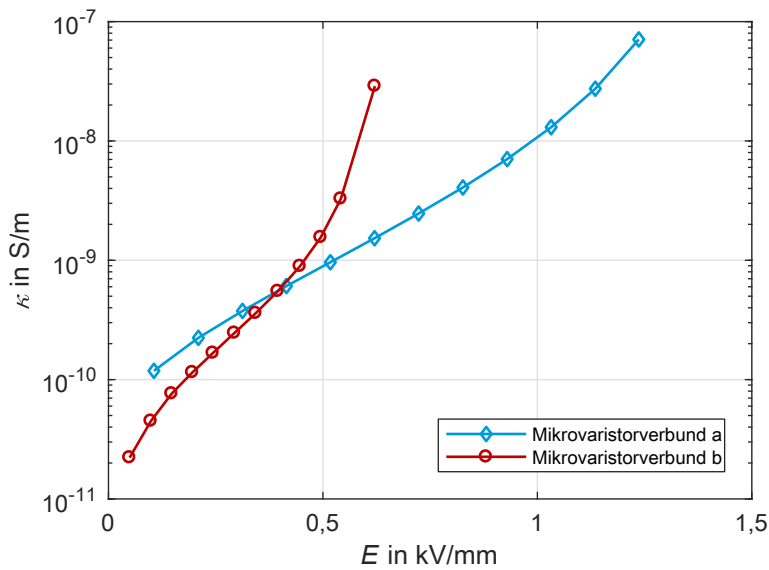
Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Varianten von Mikrovaristoren (im Folgenden als Variante a und Variante b bezeichnet) untersucht. Die Vormessungen zeigten, dass sich Kurzzeitmessungen zur Charakterisierung beider Varianten eignen.

Als Dauer zwischen dem Anlegen der Spannung und dem Aufnehmen des Messpunktes werden jeweils zwei Minuten gewählt. Der Strom wird kontinuierlich erfasst, um Unregelmäßigkeiten oder ein thermisches Weglaufen detektieren zu können. Wird im Prüfling eine Leistung im mW-Bereich umgesetzt, wird die Messdauer reduziert, um den Messfehler durch Eigenerwärmung zu begrenzen. Hierzu wird abgewartet, bis der Strom ein Minimum durchlaufen hat, dieser Wert als Messwert aufgenommen und anschließend die Spannung erhöht. Bei spezifischen Leitfähigkeiten in der Nähe des Schaltpunktes kann dies weniger als eine Minute in Anspruch nehmen. Da die Information über den zeitlichen Verlauf des Stroms nicht weiter verwertet wird, ist es nicht nötig, den Prüfling zwischen zwei Messpunkten zu depolarisieren. Daher kann die Spannung in den interessierenden Schritten stufenweise erhöht werden. Die Spannungssteigerung zwischen zwei Schritten wird linear und innerhalb von 10 Sekunden durchgeführt. Um diese Spannungssteigerungsgeschwindigkeit zu erreichen, kommt die zweite Variante des Versuchsstandes zur Charakterisierung mit Gleichspannung zum Einsatz (vgl. Anhang A.1). Die hier gezeigten Messungen wurden bei 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte aufgenommen, um mit den Daten aus den Versuchen mit Impulsspannung kombiniert werden zu können (vgl. Abschnitt 6.2.1).

Die Ergebnisse der Messungen an den beiden Verbundstoffen sind in Abbildung 6.4 in Form der  $\kappa$ -E-Kennlinien zusammengefasst. Es zeigt sich, dass bei beiden Materialien der Schaltpunkt erreicht wurde, was an der Veränderung der Steigung der Kennlinie erkennbar ist. Beide Kennlinien weisen bereits für



Feldstärken unterhalb des Schaltpunktes eine ausgeprägte Nichtlinearität auf, was sich durch die Steigung  $m_0$  der Kennlinie für geringe Feldstärken nachbilden lässt (vgl. Gleichung 2.6).



**Abbildung 6.4.:** Gleichspannungskennlinien der Verbundstoffe aus den Mikrovaristoren der Varianten a und b,  $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $RH = 50\text{ }\%$

Die ermittelten Materialparameter zur Nachbildung der Kennlinien mit Gleichung 2.6 der beiden auf diese Weise untersuchten Verbundstoffe sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die spezifische Grundleitfähigkeit  $\kappa_0$  bezeichnet dabei die theoretische spezifische Leitfähigkeit bei einer Feldstärke  $E = 0\text{ kV/mm}$  bei der gewählten Prüftemperatur. Die beiden hier untersuchten Mikrovaristorverbundstoffe werden weiterhin einer Untersuchung mit impulsförmiger Spannungsbeanspruchung unterzogen (siehe Abschnitt 6.2).

**Tabelle 6.1.:** Mittels Gleichspannungsmessung bestimmte Materialparameter der Mikrovaristorverbundstoffe zur Verwendung in Gleichung 2.6

Verbundstoff	$\kappa_0$	$m_0$	Messverfahren und Prüfbedingungen
Mikrovaristorverbundstoff a	$7 \cdot 10^{-11}\text{ S/m}$	2,15 mm/kV	2-min-Messungen, $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $RH = 50\text{ }\%$
Mikrovaristorverbundstoff b	$2,3 \cdot 10^{-11}\text{ S/m}$	3,5 mm/kV	2-min-Messungen, $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; $RH = 50\text{ }\%$

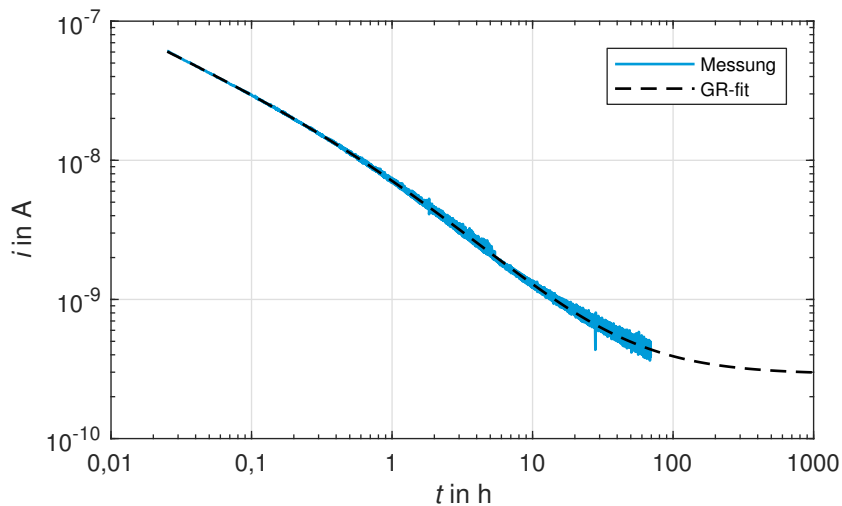
### Langzeitmessungen

Wie aus dem Stromverlauf in Abbildung 6.3 ersichtlich wird, kann die spezifische Leitfähigkeit von Verbundstoffen häufig nicht nach kurzer Messzeit ( $<1\text{ h}$ ) abgeschätzt werden. Dies ist meist bei Materialien der Fall, die als moderat nichtlineare Feldsteuermaterialien in Frage kommen oder bei denen die Perkolationschwelle nicht überschritten wurde. In DIN EN 62631-3-1 wird eine Messdauer von einer Minute vorgeschrieben (sofern nicht anders festgelegt) [DIN62631-3-1], was für viele Materialien zu gering ist, um einen stationären Zustand zu erreichen. Diesem Sachverhalt wird in der Norm bereits

Rechnung getragen und vorgeschlagen, die Leitfähigkeit an mehreren Zeitpunkten bis zu 100 Minuten anzugeben, wenn das zeitabhängige Verhalten des Materials von Interesse ist.

Dieser Ansatz ist noch immer eine starke Vereinfachung, da der Strom über der Zeit das Resultat komplexer Ladungstransportmechanismen ist (vgl. Abschnitt 2.1.2). Die spezifische Leitfähigkeit ist in diesem Fall keine *intrinsische* Materialeigenschaft. Vielmehr kann der Stromverlauf von vielen Faktoren, wie etwa der Feldstärke, den Elektrodenmaterialien oder der Probendicke abhängig sein.

Soll ein Verbundstoff als Feldsteuermaterial zum Einsatz kommen, wäre es wünschenswert, wenn dieser eine definierte spezifische elektrische Leitfähigkeit aufweist. Trotzdem kann auch ein schwach leitfähiges Material mit moderater Nichtlinearität einen sinnvollen Einsatz finden, solange seine stationäre spezifische Leitfähigkeit unter betriebsrelevanten Bedingungen gut abgeschätzt werden kann (vgl. Abschnitt 4.4 und [Ten2015]). Daher werden im Rahmen dieser Arbeit Langzeitmessungen und Auswertungen nach verschiedenen Methoden an schwach leitfähigen Feldsteuermaterialien angewandt, um sowohl die Tauglichkeit der Methoden als auch die der verfügbaren Materialien einzuschätzen.



**Abbildung 6.5.:** Messung (blau) und Nachbildung mittels der General-Response-Funktion (schwarz, strichliert) des Stromverlaufs durch einen E12b-Verbundstoffprüfling,  $U = 8 \text{ kV}$ ;  $\vartheta = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , nach [Hus2015\*]

Eine gute Methode zur Abschätzung der stationären spezifischen Leitfähigkeit stellt die Nachbildung des Stromverlaufs mittels einer Anpassungsfunktion dar. In der Literatur werden für feste Isolierstoffe meist die *Curie-von Schweidler-Funktion* (kurz: CvS-Funktion, engl.: CvS-fit) oder die *General-Response-Funktion* (kurz: GR-Funktion, engl.: GR-fit) vorgeschlagen [Lut2011]. Der Stromverlauf der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Materialien lässt sich in den meisten Fällen besser durch die GR-Funktion nachbilden, weshalb nur diese Anpassungsfunktion zum Einsatz kommt<sup>2</sup> (vgl. Gleichung 6.1). Ein exemplarischer Polarisationsstromverlauf mit erfolgreicher Anpassung der GR-Funktion ist in Abbildung 6.5 dargestellt.

$$i(t) = \frac{B}{\left(\frac{t}{\tau_{\text{trans}}}\right)^{n_1} + \left(\frac{t}{\tau_{\text{trans}}}\right)^{n_2}} + I_{\text{stat}} \quad (6.1)$$

<sup>2</sup> Genau genommen stellt die CvS-Funktion einen Spezialfall der allgemeineren GR-Funktion dar.

Die Parameter der Funktion sind nicht direkt aus einer physikalischen Modellbildung heraus bestimmbar. Die Transitzeit  $\tau_{\text{trans}}$  ist verknüpft mit der Zeit, welche die primären Ladungsträger im Prüfkörper benötigen, um zur Gegenelektrode zu gelangen. Der stationäre Strom  $I_{\text{stat}}$  ist als der rein resistive Leitungsstrom zu verstehen. Der Faktor  $B$  und die Exponenten  $n_1$  und  $n_2$  bestimmen Höhe und Form des zeitabhängigen Teils der Gleichung. Es handelt sich sowohl bei der CvS-Funktion als auch bei der GR-Funktion um empirische Beschreibungen der Polarisationsstromverläufe. Durch sie können eine Reihe von überlagerten Polarisationsvorgängen mit unterschiedlichen Zeitkonstanten beschrieben werden, was dem Verständnis der Vorgänge in festen Isolierstoffen entspricht (vgl. Abschnitt 2.1.2).

Die Auswertung des zeitlichen Verlaufs des Stroms durch einen Prüfling setzt voraus, dass dieser im Vorfeld vollständig depolarisiert wurde. Dies wird durch die in Abschnitt 5.4 beschriebene Konditionierung sichergestellt. Anschließend wird die Spannung in einer im Vergleich zur Messdauer kurzen Zeit von  $<90$  s auf die gewünschte Prüfspannung hochgefahren und anschließend konstant gehalten. Das Erreichen der Prüfspannung wird als Startzeitpunkt für die Auswertung ( $t = 0$  s) gewertet. Der Strom wird über die gesamte Dauer der Prüfung aufgezeichnet. Temperatur und Luftfeuchte werden mit Hilfe des Klimaschranks konstant gehalten, da Änderungen der Umgebungsbedingungen einen direkten Einfluss auf den Strom durch den Prüfling ausüben. Für diese Messungen wird die erste Variante des Versuchsstandes zur Charakterisierung mit Gleichspannung eingesetzt (vgl. Anhang A.1).

Nach der Messung wird der Stromverlauf mittels der GR-Funktion nachgebildet und der stationäre Anteil  $I_{\text{stat}}$  ermittelt.

Um die Eignung dieser Auswertung abzuschätzen, werden Ergebnisse der General-Response-Nachbildung (durchgeführt mit Messdaten über 70 h) mit denen einer Messung über 1000 h verglichen. Hierzu werden je drei Prüflinge bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht und das Ergebnis von Gleichung 6.1 für 1000 h ermittelt. Parallel wird eine Messung an drei weiteren Prüflingen bei den gleichen Temperaturen für 1000 h durchgeführt. Die Resultate (zum besseren Vergleich umgerechnet in die spezifische Leitfähigkeit) sind in Tabelle 6.2 einander gegenübergestellt.

Die Abweichungen sind, gemessen an einer zeitlichen Ersparnis von mehr als Faktor 14, vertretbar. Ein Fehler von weniger als Faktor 3 in der Bestimmung der spezifischen Grundleitfähigkeit ist bei Werten im Bereich von  $10^{-14}$  S/m hinnehmbar, da hier keine Gefahr durch eine Eigenerwärmung besteht. Zudem wird die spezifische Leitfähigkeit eher überschätzt. Damit kann durch die Nachbildung nach der GR-Funktion eine nutzbare Abschätzung der Gleichstromleitfähigkeit gewonnen werden, speziell wenn das Ziel eine erste Einordnung eines potentiellen neuen Feldsteuermaterials ist.

**Tabelle 6.2.:** Vergleich der mittels des GR-fits ermittelten spezifischen Leitfähigkeit mit einer Messung über 1000 h

$\vartheta$ (in °C)	$\kappa_{1000h}$	$\kappa_{GR,1000h}$	$\kappa_{GR,1000h}/\kappa_{1000h}$
60	$1,8 \cdot 10^{-14}$ S/m	$5,3 \cdot 10^{-14}$ S/m	2,9
80	$4,9 \cdot 10^{-14}$ S/m	$8,2 \cdot 10^{-14}$ S/m	1,7
105	$19,7 \cdot 10^{-14}$ S/m	$18,1 \cdot 10^{-14}$ S/m	0,9

Um durch diese Methode eine gute Abschätzung des stationären Stroms zu erzielen, sind trotzdem noch Messungen im Bereich mehrerer Tage notwendig. Daher wird sie nicht bei allen hier untersuchten Materialien angewendet. Zeichnet sich durch die Vormessung ab, dass sich innerhalb einer für einen Da-

tenpunkt gut vertretbaren Messdauer (hier <24 h) ein stationärer Wert einstellt, wird diese abgewartet. Weiterhin werden Messungen über eine Stunde je Messpunkt durchgeführt. Der zeitliche Aufwand ist dabei zwar sehr gering, allerdings wird die spezifische Leitfähigkeit von schwach leitfähigen Feldsteuermaterialien mittels dieser Methode überschätzt. Auch ist eine Verbesserung der Abschätzung durch die Anwendung des GR-fits bei Messungen dieser Dauer kaum möglich. Hierzu muss mindestens die Transitzeit abgewartet werden, die bei den hier untersuchten Prüflingen, je nach Temperatur, Werte zwischen 1,5 h und 300 h annimmt.

Die Ergebnisse aller mittels Langzeitmessungen untersuchter Verbundstoffe sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Es handelt sich dabei um Verbundstoffe aus einem Großteil der in Abschnitt 5.1 vorgestellten Füllstoffe (der Name des Verbundstoffes in Tabelle 6.3 ist direkt vom jeweiligen Füllstoff abgeleitet). Zur kompakten Darstellung der wichtigsten Abhängigkeiten wurde  $m_0$  für eine Temperatur und  $W_a$  für eine Feldstärke (jeweils in der Tabelle angegeben) ermittelt. Eine Abschätzung der spezifischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von Feldstärke und Temperatur kann mittels Gleichung 6.2 erfolgen. Wurde nur die Abhängigkeit von der Feldstärke oder der Temperatur ermittelt, kann Gleichung 6.3, respektive Gleichung 6.4 herangezogen werden. Für die Gleichungen 6.2 und 6.4 wurde die spezifische Leitfähigkeit bei 20 °C,  $\kappa_{20C}$ , als Referenz herangezogen, da diese anschaulicher ist als der Wert bei 0 K. Weiterhin sind in der Tabelle die genutzten Mess- bzw. Auswerteverfahren und der Raum der Prüfparameter angegeben. Die Bewertung der Eignung als Feldsteuermaterial erfolgt nur in Bezug auf die Anforderungen im Rahmen dieser Arbeit, die für gasisolierte Systeme für Gleichspannungsanwendungen ermittelt wurden.

$$\kappa(\vartheta; E) = \kappa_{20C} \cdot e^{-\frac{W_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293,15K}\right)} \cdot 10^{m_0 \cdot (E - E_{ref})} \quad (6.2)$$

$$\kappa(E) = \kappa_0 \cdot 10^{m_0 \cdot E} \quad (6.3)$$

$$\kappa(\vartheta) = \kappa_{20C} \cdot e^{-\frac{W_a}{k_B} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{293,15K}\right)} \quad (6.4)$$

In einigen Fällen zeigt sich ein instabiler Verlauf des Stroms über der Zeit, der sich keinem bekannten Polarisationsmechanismus zuordnen lässt. Weiterhin kommt es bei zu leitfähigen Materialien zu einem mit der Zeit ansteigenden Strom in Folge von Eigenerwärmung. Auf diese Effekte wird in Abschnitt 6.1.2 im Kontext von Pulvermessungen detaillierter eingegangen. In diesen Fällen ist eine weitere Charakterisierung des Materials hinfällig, da es als potentiell Feldsteuermaterial ungeeignet ist. Auch hierauf wird in Tabelle 6.3 hingewiesen.

Neben den elektrischen Eigenschaften kamen auch mechanische Eigenschaften der Füllstoffpartikel als Ausschlusskriterium infrage. Diese Aspekte werden in Abschnitt 6.3 diskutiert. In diesem Fall war eine detailliertere elektrische Charakterisierung ebenfalls nicht sinnvoll.

**Tabelle 6.3.: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen an Epoxidharzformstoff-Verbundstoffen unterhalb der Schaltfeldstärke**

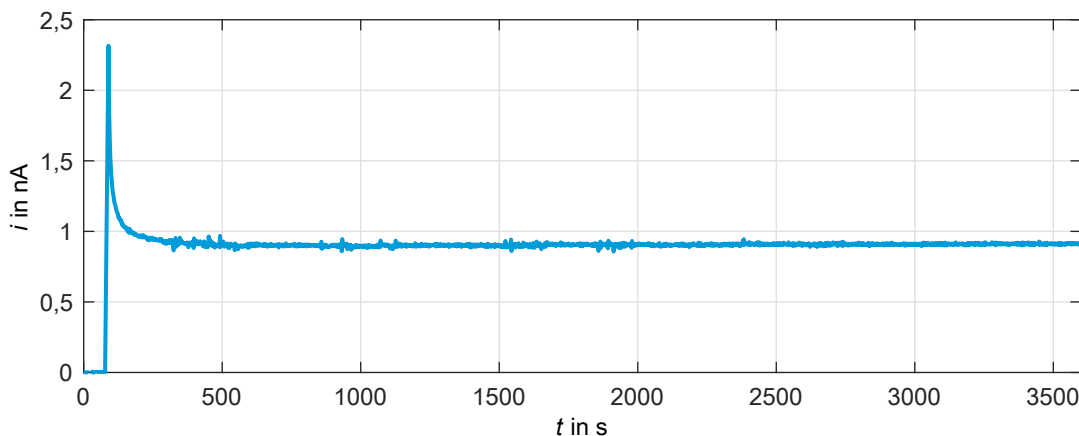
Verbundstoff (Nachbildung)	Eigenschaften des Füllstoffs	Ergebnisse	Messverfahren und Prüfbedingungen	Eignung als Feldsteuermaterial
MFF2 (Gl. 6.2) ( $E_{ref} = 2 \text{ kV/mm}$ )	substratbasiert, planar	$\kappa_{20C} = 4,9 \cdot 10^{-14} \text{ S/m}$ (bei $2 \text{ kV/mm}$ ) $W_a = 0,52 \text{ eV}$ (bei $2 \text{ kV/mm}$ ) $m_0 = 0,225 \text{ mm/kV}$ (bei $30^\circ\text{C}$ )	1-h-Messungen, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30; 60; 80; 105^\circ\text{C}$ ; $E = 1; 2; 3; 4 \text{ kV/mm}$	ja, Strategie 2
E12b (Gl. 6.4)	substratbasiert, planar	$\kappa_{20C} = 8,6 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$ (bei $4 \text{ kV/mm}$ ) $W_a = 0,34 \text{ eV}$ (bei $4 \text{ kV/mm}$ )	70-h-Messungen mit GR-Fit, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30; 60; 80; 105^\circ\text{C}$ ;	möglich, Strategie 2
E14b (Gl. 6.2) ( $E_{ref} = 2 \text{ kV/mm}$ )	substratbasiert, planar	$\kappa_{20C} = 5,9 \cdot 10^{-15} \text{ S/m}$ (bei $2 \text{ kV/mm}$ ) $W_a = 0,66 \text{ eV}$ (bei $2 \text{ kV/mm}$ ) $m_0 = 0,12 \text{ mm/kV}$ (bei $60^\circ\text{C}$ )	1-h-Messungen, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 60; 80; 105^\circ\text{C}$ ; $E = 0,5; 1; 2; 3; 4 \text{ kV/mm}$	ja, Strategie 2
M-b-5	substratbasiert, unregelmäßig	$\kappa = 3,2 \cdot 10^{-13} \text{ S/m}$ (bei $0,25 \text{ kV/mm}$ ) $\kappa = 5,1 \cdot 10^{-13} \text{ S/m}$ (bei $0,5 \text{ kV/mm}$ )	70-h-Messungen mit GR-Fit, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ ; $E = 0,25; 0,5 \text{ kV/mm}$	nein, mech. instab., siehe Abschnitt 6.3
M-b-05	substratbasiert, unregelmäßig	$\kappa = 4,1 \cdot 10^{-13} \text{ S/m}$ (bei $0,25 \text{ kV/mm}$ ) $\kappa = 1,3 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$ (bei $0,5 \text{ kV/mm}$ )	70-h-Messungen mit GR-Fit, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ ; $E = 0,25; 0,5 \text{ kV/mm}$	nein, mech. instab., siehe Abschnitt 6.3
M-b-005	substratbasiert, unregelmäßig	$\kappa = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$ (bei $0,25 \text{ kV/mm}$ )	70-h-Messungen mit GR-Fit, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30^\circ\text{C}$	nein, mech. instab., siehe Abschnitt 6.3
M-b-27	substratbasiert, sphärisch	$\kappa = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ S/m}$ (bei $0,05 \text{ kV/mm}$ ) Beginn der Messung, therm. Weglaufen	Messung abgebrochen, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ ;	nein, zu leitfähig
M-c-7 (Gl. 6.3)	substratbasiert, planar	$\kappa_0 = 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ S/m}$ (bei $30^\circ\text{C}$ ) $m_0 = 1,26 \text{ mm/kV}$ (bei $30^\circ\text{C}$ )	12-h-Messungen (stationär), $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ ; $E = 0,25; 0,5; 1 \text{ kV/mm}$	nein, zu leitfähig
M-c-9 (Gl. 6.3)	substratbasiert, planar	$\kappa_0 = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ S/m}$ (bei $30^\circ\text{C}$ ) $m_0 = 0,17 \text{ mm/kV}$ (bei $30^\circ\text{C}$ )	12-h-Messungen (stationär), $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ ; $E = 0,25; 0,5; 1 \text{ kV/mm}$	nein, zu leitfähig
M-e-26	substratbasiert, sphärisch	$\kappa = 5,85 \cdot 10^{-5} \text{ S/m}$ (bei $0,05 \text{ kV/mm}$ ) Beginn der Messung, therm. Weglaufen	Messung abgebrochen, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30^\circ\text{C}$ ;	nein, zu leitfähig
M-f-37	substratbasiert, sphärisch	instabiles Verhalten	Messung abgebrochen	nein
M-g-44	substratbasiert, sphärisch	instabiles Verhalten	Messung abgebrochen	nein
EP1 (Gl. 6.4)	nicht-funktionell gefüllt	$\kappa_{20C} = 5,7 \cdot 10^{-16} \text{ S/m}$ (bei $4 \text{ kV/mm}$ ) $W_a = 0,95 \text{ eV}$ (bei $4 \text{ kV/mm}$ )	300-h-Messungen, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 60; 70; 80; 85; 95; 105^\circ\text{C}$ ;	-

## 6.1.2 Messungen an pulverförmigen Prüflingen

Die Messung von Prüflingen in Pulverform wird teilweise von den Herstellern von Füllstoffen praktiziert, um diese zu charakterisieren. Da die Füllstoffeigenschaften bei einem überperkolativ gefüllten Verbundstoff die elektrischen Materialeigenschaften bestimmen sollten (vgl. Abschnitt 2.2.2), wird davon ausgegangen, dass die durch diese Messungen gewonnenen Informationen bereits eine hohe Aussagekraft besitzen. Allerdings ist das Vorgehen bei Messungen von Feldsteuermaterialien in Pulverform derzeit weder genormt, noch besteht Einvernehmen über ein allgemein akzeptiertes Verfahren. Daher sollen im Rahmen dieser Arbeit Messungen an Pulverprüflingen durchgeführt werden um herauszufinden:

- wie sich reproduzierbare und aussagekräftige Messungen an pulverförmigen Füllstoffen durchführen lassen,
- welche Einflussfaktoren auf diese bestehen,
- welche Aussagekraft eine Messung an einem Pulverprüfling in Bezug auf einen daraus hergestellten Verbundstoff hat.

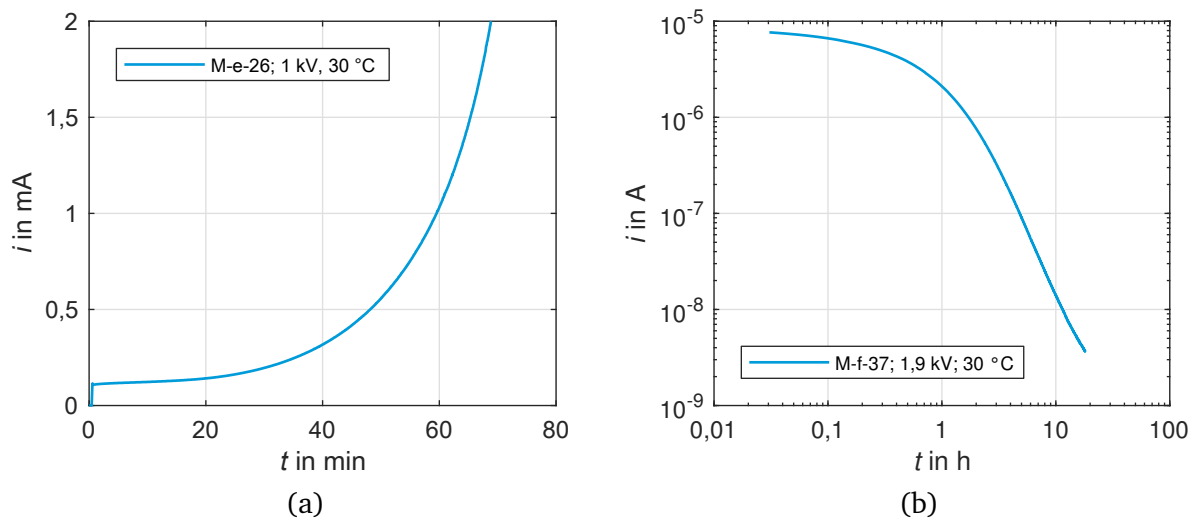
Bei der Untersuchung von Pulverproben wird ebenfalls zuerst eine Messung über einen längeren Zeitraum durchgeführt, um die zielführendste Messmethodik auswählen zu können. Ein exemplarisches Beispiel ist in Abbildung 6.6 gezeigt. Die an Mikrovaristoren der Variante a durchgeführte Vormessung über 12 Stunden zeigt, dass sich bereits nach 10 Minuten ein Strom einstellt, der nur um 5 % vom stationären Endwert abweicht. Im Vergleich dazu würde eine Messdauer von 10 s zu einer Überschätzung der spezifischen Leitfähigkeit um 56 % führen. Als Kompromiss aus einer schnellen Aufzeichnung von Messwerten und nutzbaren Ergebnissen werden 10 Minuten als Messdauer je Spannungsschritt für diesen Prüfling gewählt.



**Abbildung 6.6.:** Ausschnitt aus der Vormessung an Mikrovaristoren der Variante a über einen Zeitraum von 12 h, gezeigt ist die erste Stunde,  $U = 1,5 \text{ kV}$ ;  $\vartheta = 30^\circ \text{C}$

In einigen Fällen zeigt die Vormessung direkt auf, dass der potentielle Füllstoff für den Einsatz in einem gasisolierten Gleichspannungssystem ungeeignet ist. So zeigt sich, dass der Pulverprüfling M-e-26 als zu leitfähig einzustufen ist. Wie in Abbildung 6.7 (a) zu erkennen, führt das Anlegen der Prüfspannung direkt zu einem thermischen Weglaufen des Prüflings. Da das Material zumindest für den Einsatz in

Anwendungen mit geringen Feldstärken nicht direkt verworfen werden muss, wurde trotzdem aus dem Startwert des Stroms die spezifische Leitfähigkeit abgeschätzt und in Tabelle 6.4 übernommen.



**Abbildung 6.7.:** Beispiele für Füllstoffe, die bereits durch die Vormessung als ungeeignet für den Einsatz in gasisolierten Gleichspannungsisoliersystemen eingestuft wurden, (a) M-e-26: zu leitfähig, läuft thermisch weg, nach [Mor2016\*], (b) M-f-37: instabiles Verhalten des Stroms über der Zeit, keinem Polarisationsmechanismus zuzuordnen, nach [Gro2016\*]

Ein weiteres Phänomen, das zu einem Ausschluss von Materialien führt, ist in Abbildung 6.7 (b) dargestellt. Gezeigt ist die Vormessung eines Pulverprüflings der Charge M-f-37. Hier stellt sich ein mit der Zeit abnehmender Stromverlauf ein, der keinem bisher beobachteten Polarisationsverhalten zugeordnet werden kann. Das zeitabhängige Verhalten ist stark ausgeprägt, obwohl es sich um einen vergleichsweise leitfähigen Prüfling handelt ( $1,3 \cdot 10^{-8}$  S/m zu Beginn der Messung). Typischerweise weisen Materialien mit höherer spezifischer Leitfähigkeit eine kürzere Polarisationsdauer auf. Dieses Verhalten konnte in ähnlicher Ausprägung bei den Füllstoffen M-g-34 und M-g-44 beobachtet werden. Die Prüflinge zeigen weiterhin keinen signifikanten Depolarisationsstrom und weisen bei erneuter Belastung bereits zu Beginn eine reduzierte spezifische Leitfähigkeit gegenüber dem ersten Versuch auf. Da es sich bei diesem Phänomen nicht um einen bekannten Polarisationsmechanismus handelt, ist nicht auszuschließen, dass die Materialien eine chemische Instabilität aufweisen. Es ist denkbar, dass eine Reaktion auftritt, die durch das elektrische Feld ermöglicht oder beschleunigt wird und die zu einer irreversiblen Veränderung der Materialeigenschaften führt. Diese Materialien sind damit ebenfalls für den Einsatz in gasisolierten Gleichspannungsisoliersystemen nicht zu empfehlen. Unabhängig von der Ursache ist eine nicht vorhersehbare Veränderung der elektrischen Eigenschaften ein Ausschlusskriterium für die Nutzung als Feldsteuermaterial.

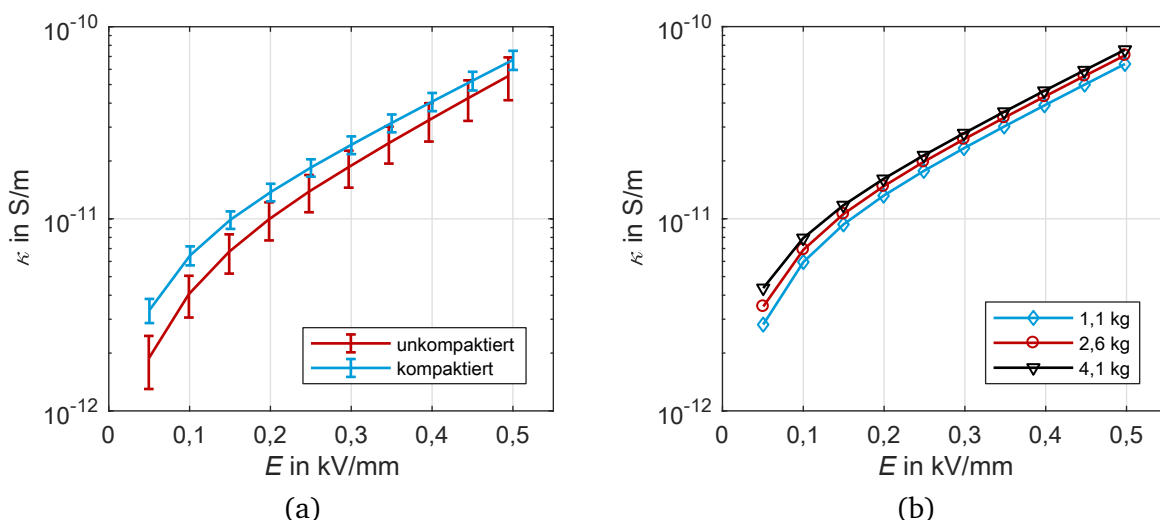
### Einflussfaktoren auf Pulvermessungen

Neben der Ermittlung der  $\kappa$ -E-Kennlinie wird an Variante a der Mikrovaristoren der Einfluss mehrerer Umgebungs- bzw. Prüfbedingungen auf die Ergebnisse der Messungen untersucht. Es handelt sich dabei um die *Temperatur*, die *Luftfeuchte*, den *Anpressdruck* der Hochspannungselektrode und die *Kom-*



paktierung des Pulvers (vgl. Abschnitt 5.3). Zuletzt wird in Stichproben geprüft, ob die Zugabe von *Isolierflüssigkeiten* einen Einfluss auf die gemessene spezifische Leitfähigkeit ausübt.

Alle Kennlinien für trockenes Pulver, also für Pulverproben ohne Zugabe einer Isolierflüssigkeit, werden bis zu einer Feldstärke von 0,5 kV/mm untersucht, um Durchschläge zu vermeiden. Sofern der entsprechende Parameter nicht variiert wurde, gelten die folgenden Werte:  $RH < 3\%$ ;  $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $m_{\text{El1}} = 1128\text{ g}$ ; keine Kompaktierung, keine Isolierflüssigkeit.



**Abbildung 6.8.:** Spezifische Leitfähigkeit von Mikrovaristoren der Variante a in Abhängigkeit der Feldstärke und (a) der Kompaktierung (mittels Rütteltisch), (b) des Anpressdrucks der Elektroden, nach [Sec2017b]

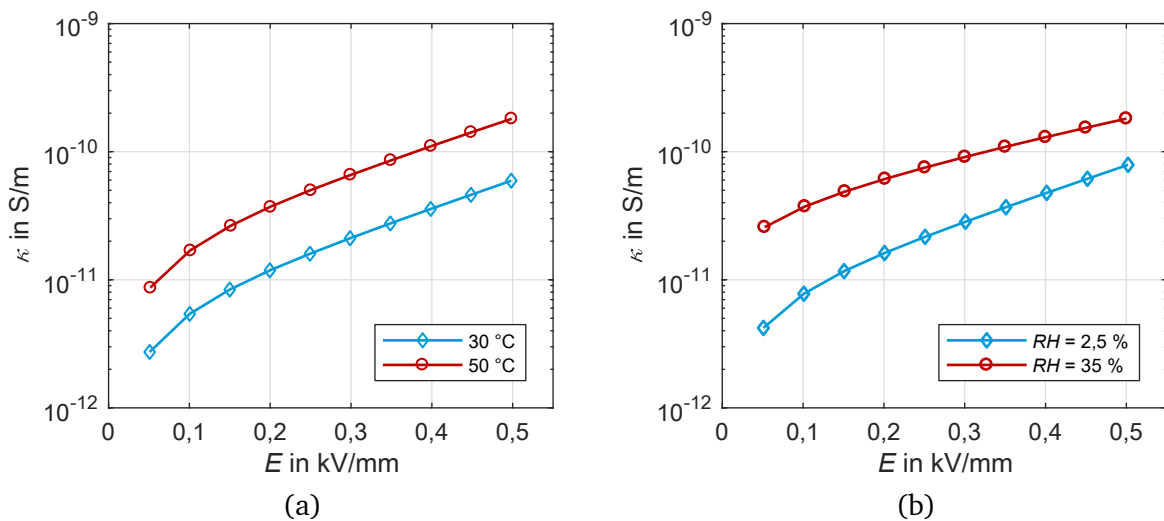
Der Einfluss der Kompaktierung auf die Pulverprüflinge ist in der Kennliniendarstellung in Abbildung 6.8 (a) zusammengefasst. Jeder Punkt der Kennlinie stellt dabei den Mittelwert aus neun Pulverproben dar, die Balken zeigen die Standardabweichung. Mit „Kompaktierung“ ist die Verdichtung auf dem Rütteltisch (mit aufgesetzter Hochspannungselektrode) gemeint, im Gegensatz zu händischen Kompaktierungsstößen, die bei jeder Pulverprobe angewandt werden (vgl. hierzu Abschnitt 5.3). Jede Probe wurde nur einmal für die Untersuchungen genutzt. Es zeigt sich, dass allgemein eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse vorliegt. Speziell im Bereich geringer Feldstärken wiesen die kompaktierten<sup>3</sup> Prüflinge eine leicht erhöhte Leitfähigkeit auf (bis zu Faktor 1,78 bei der geringsten Prüffeldstärke). Weiterhin kann die Standardabweichung durch die Kompaktierung gesenkt werden. Bei der Berechnung der Feldstärke wird die durch den Kompaktierungsvorgang reduzierte Höhe des Pulverprüflings berücksichtigt.

Das Ergebnis erschließt sich intuitiv: Durch die Verdichtung existieren mehr parallele Pfade, woraus eine Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit resultiert. Weiterhin sind durch die Kompaktierung weniger Ausreißer durch örtlich sehr lose gepackte Partikel zu erwarten. Daher ist die Kompaktierung von Pul-

<sup>3</sup> Die an diesem Pulver erzielte Kompaktierung beträgt 10%. Obwohl das Pulver eine gute Fließfähigkeit und mit  $5,53\text{ g/cm}^3$  auch eine hohe Dichte aufweist, nimmt es im unkompaktierten Fall nur 46% des Prüflingsvolumens ein. Zum Vergleich: Bei gleich großen Kugeln ergibt sich für die kubisch einfache Kugelpackung bereits ein Volumenanteil von 52,4%.

verproben prinzipiell empfehlenswert. Der Effekt ist allerdings deutlich kleiner als der mögliche Einfluss von Isolierstoffmatrizen, wie im Folgenden noch gezeigt werden wird.

Der Einfluss des Anpressdrucks der Elektroden wird durch eine Variation des Gewichts der Hochspannungselektrode erzielt. Durch eine Erhöhung des Gewichts der anfänglichen 1,1 kg auf 4,1 kg kann bei der geringsten eingesetzten Feldstärke eine um den Faktor 1,55 erhöhte spezifische Leitfähigkeit festgestellt werden. Der Einfluss des Anpressdrucks ist demnach unterproportional. Für höhere, technisch interessante Feldstärken nimmt er weiterhin ab und beträgt nur 19 % bei 0,5 kV/mm. Die Kennlinien sind in Abbildung 6.8 (b) zusammengefasst. Für diese Messung wurde nur eine (unkompaktierte) Pulverprobe genutzt und das Gewicht sukzessive erhöht, um einen Einfluss durch die statistische Streuung unterschiedlicher Pulverprüflinge zu vermeiden.



**Abbildung 6.9.:** Spezifische Leitfähigkeit von Mikrovaristoren der Variante a in Abhängigkeit der Feldstärke und (a) der Temperatur, (b) der Luftfeuchte, nach [Sec2017b]

An zwei weiteren Prüflingen wird jeweils stichprobenartig untersucht, wie sich eine Änderung der Umgebungsbedingungen Temperatur und Luftfeuchte auf die gemessene spezifische Leitfähigkeit auswirkt. Das Ergebnis für eine Veränderung der Temperatur ist in Abbildung 6.9 (a) dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die bei 50 °C aufgenommene Kennlinie beinahe über den gesamten Bereich der Feldstärke gleichmäßig in Richtung höherer spezifischer Leitfähigkeit verschoben ist. In der halblogarithmischen Darstellung deutet dies auf eine Erhöhung der Leitfähigkeit um einen konstanten Faktor hin, der im Fall des untersuchten Prüflings bei 3,1 lag. Eine Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit durch eine Steigerung der Temperatur ist im betrachteten Feldstärke- und Temperaturbereich zu erwarten und wird daher nicht weiter diskutiert.

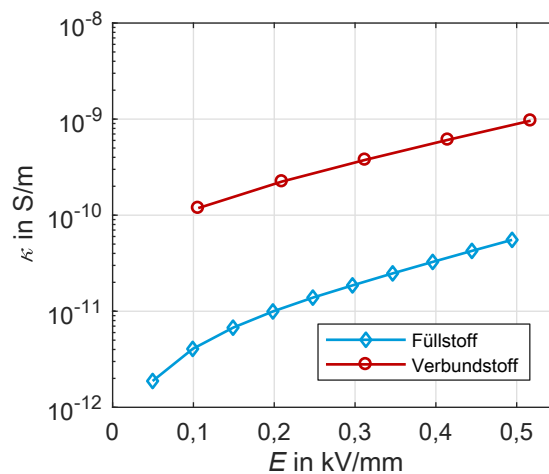
Die Variation der Luftfeuchte übt ebenfalls einen Einfluss auf die spezifische Leitfähigkeit des Mikrovaristorpulvers der Variante a aus, wie aus der Betrachtung von Abbildung 6.9 (b) ersichtlich wird, in der die  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie eines Pulverprüflings bei  $RH < 3 \%$  der des selben Prüflings bei  $RH = 35 \%$  gegenübergestellt ist<sup>4</sup>. Die größte Abweichung von Faktor 6,1 tritt im Bereich niedriger Feldstärken auf. Zu höheren Feldstärken hin nimmt der Einfluss ab. Die Steigung  $m_0$  würde demnach unterschätzt wer-

<sup>4</sup> Dieser Effekt wird auch von der Literatur bestätigt [Mül2012], allerdings kam eine abweichende Versuchsmethodik zum Einsatz.

den, wenn die Messung nicht unter trockenen Bedingungen durchgeführt wird. Der Einfluss lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass die höhere Luftfeuchte zur Adsorption von Wasser an den Partikeln führt. Es ist denkbar, dass hierdurch der Kontaktübergangswiderstand zwischen den einzelnen Partikeln reduziert wird. Bei ausreichender Benetzung könnte sich zudem ein paralleler Leitpfad durch den Wasserfilm ausbilden. Auf Basis dieses Ergebnisses wird entschieden, Füllstoffe für den Einsatz in gasisolierten Isoliersystemen bei möglichst geringer Luftfeuchte zu untersuchen. Da die eingesetzten Isoliergase üblicherweise trocken gehalten werden, stellt dies eine realitätsnahe Untersuchungsbedingung dar. Weiterhin sollte die Luftfeuchte während der Messung in Datenblättern von Füllstoffen dokumentiert werden.

### Einfluss der Isolierstoffmatrix

Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt wurde, stellt sich derzeit die Frage, ob sich die Messung der elektrischen Eigenschaften von Füllstoffen eignet, um eine Aussage über die Eigenschaften eines daraus gefertigten Verbundstoffes treffen zu können. Um diese zu beantworten, wird die Gleichspannungskennlinie des Mikrovaristorpulvers der Variante a mit der des daraus hergestellten Verbundstoffes verglichen (siehe Abbildung 6.10). Dabei fällt auf, dass die spezifische Leitfähigkeit des Verbundstoffes um etwa eine Größenordnung über der des Pulverprüflings liegt. Die Steigung  $m_0$  der jeweiligen Kennlinien ist vergleichbar.



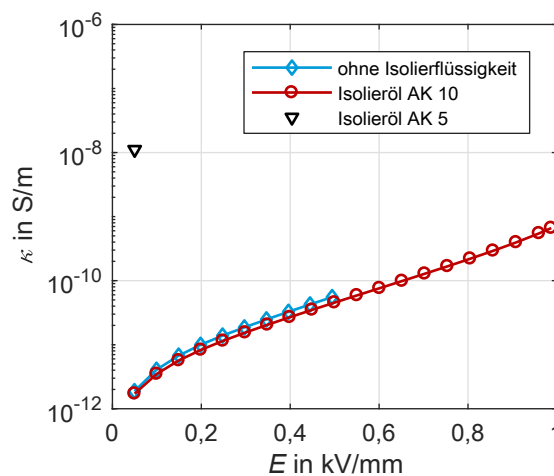
**Abbildung 6.10.:** Spezifische Leitfähigkeit von Mikrovaristoren der Variante a als Pulverprüfling und des daraus hergestellten Verbundstoffes in Abhängigkeit der Feldstärke, nach [Sec2017b]

Dieses überraschende Ergebnis zeigt auf, dass die Messung der Eigenschaften von Pulvern nur begrenzt eine Voraussage der Eigenschaften eines Verbundstoffes liefern kann. An sich wäre im Verbundstoff eine niedrigere spezifische Leitfähigkeit zu erwarten. Die Ursache für diese Diskrepanz ist nicht vollumfänglich geklärt. In der Literatur wurden ähnliche Effekte beobachtet und teilweise damit erklärt, dass das während der Aushärtung schrumpfende Epoxidharz einen Druck auf die Partikel ausübt. Diese könnten hierdurch eine bessere Kontaktierung untereinander aufweisen. Auch chemische Reaktionen mit der Isolierstoffmatrix werden nicht ausgeschlossen [Don2011].

Ein Hinweis zur Lösung dieser Fragestellung könnte möglicherweise durch die Untersuchung des Einflusses von zugegebenen Isolierflüssigkeiten gewonnen werden. Hierzu werden Messungen mit zwei un-

terschiedlichen Silikonölen durchgeführt: *Wacker® AK 5* und *Wacker® AK 10*. Diese werden als Isolieröle in der Hochspannungstechnik empfohlen und unterscheiden sich in ihrer Viskosität. *Wacker® AK 5* weist eine kinematische Viskosität von ca.  $5 \text{ mm}^2/\text{s}$  auf, während die von *Wacker® AK 10* etwa  $10 \text{ mm}^2/\text{s}$  beträgt (Datenblätter: siehe Anhang A.3). Beide zählen zu den niederviskosen Isolierölen, wodurch sie geeignet sind, die Lücken zwischen den kleinen Partikeln (mittlerer Durchmesser:  $81 \mu\text{m}$ ) zu füllen. Der ursprüngliche Hintergrund der Zugabe von Isolierflüssigkeiten ist die Unterdrückung von Teilentladungen, wodurch die Charakterisierung von Pulvern auch in den Bereich höherer Feldstärken ermöglicht wird. Dies ist allerdings nur sinnvoll, wenn durch die Zugabe der Isolierflüssigkeit keine signifikante Beeinflussung der Messergebnisse entsteht.

Die Isolieröle werden vor der Zugabe zum Pulverprüfling ebenfalls im Vakuumofen getrocknet. Mit beiden Isolierölen wird eine vollständige Durchdringung des Pulvers erzielt. Die Konditionierung wird am fertig vorbereiteten Prüfling inklusive des Isolieröls durchgeführt. Abgesehen davon wird die Messmethodik gegenüber den bisher vorgestellten Messungen unverändert übernommen. Die beiden Isolieröle wirken sich grundlegend unterschiedlich auf die gemessene spezifische Leitfähigkeit aus: Durch die Beigabe von AK 10 tritt annähernd keine Veränderung der Kennlinie auf. Im Gegensatz dazu ist die spezifische Leitfähigkeit der mit AK 5 versetzten Pulverprobe um etwa Faktor zehntausend gegenüber der *trockenen* Pulverprobe erhöht. Die Messung wird daher nur im Bereich geringer Feldstärken durchgeführt, um ein thermisches Weglaufen des Prüflings zu verhindern. In Abbildung 6.11 sind die Messungen daher nur durch einen Datenpunkt repräsentiert.



**Abbildung 6.11.:** Spezifische Leitfähigkeit von Mikrovaristoren der Variante a ohne und mit Zugabe von Isolierflüssigkeiten

Anhand dieser Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass die Isolierstoffmatrix einen signifikanten Einfluss auf die spezifische Leitfähigkeit ausüben kann. Der durch die Isolierstoffmatrix auf die Partikel ausgeübte Druck kann dabei nicht die alleinige Ursache darstellen, da dieser im Silikonöl im Vergleich zum Epoxidharz vernachlässigbar sein sollte.

Um die spezifische Leitfähigkeit der beiden Isolieröle als Ursache für das beobachtete Phänomen auszuschließen, wird diese bei den relevanten Prüfbedingungen ermittelt. In beiden Fällen liegt die spezifische Leitfähigkeit unterhalb von  $10^{-12} \text{ S/m}$  und kann damit keinen signifikanten Einfluss nehmen.

---

Die beiden Silikonöle werden daher einer chemischen Analyse unterzogen<sup>5</sup>. Dabei kann festgestellt werden, dass beide aus den selben Molekülgruppen aufgebaut und in technischem Maße frei von Verunreinigungen sind. Dies deckt sich mit den Angaben des Herstellers. Eine chemische Reaktion hätte demnach bei beiden untersuchten Silikonölen auftreten müssen und scheint in diesem Fall nicht als plausible Erklärung in Frage zu kommen.

Ein weiterer möglicher Erklärungsansatz ist die Bildung einer Interphase: Es ist denkbar, dass sich die Molekülketten der Silikonöle (oder des Epoxidharzes) direkt um die Füllstoffpartikel geordnet ausrichten. Der Effekt wäre mit der Bildung von Interphasen in Nanofüllstoffkompositen vergleichbar [Tan2005], [Küc2017], [Sei2014]. Dies kann zu einer lokalen Veränderung der Eigenschaften des Polymers führen, wie etwa auch der spezifischen Leitfähigkeit. Eine geordnete Struktur zwischen zwei Füllstoffpartikeln, die eine erhöhte spezifische Leitfähigkeit aufweist, könnte damit wie eine virtuell vergrößerte Kontaktfläche zwischen den Partikeln wirken.

Nach Begutachtung dieser Ergebnisse wurde beschlossen, die Ermittlung der spezifischen Leitfähigkeit von Pulverproben ohne Zugabe von Isolierflüssigkeiten durchzuführen. Vor dem Hintergrund der Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der Messungen an Füllstoffen und Verbundstoffen erscheint die Leitfähigkeitsmessung bei höheren Feldstärken erst bei fertigen Verbundstoffen sinnvoll. Die Messungen an Pulverproben bei geringen Feldstärken sind ausreichend, um einen Vergleich zwischen den Pulvern zu ermöglichen und damit den Entwicklungsprozess schnell beurteilen zu können. Eine Übersicht über alle untersuchten Pulverproben ist in Tabelle 6.4 gegeben. Für zwei Prüflinge wurde der Einfluss der Feldstärke ermittelt (vgl. Gleichung 6.3). Die Eignung der Füllstoffe zum Einsatz in Feldsteuermaterialien wird anhand der Anforderungen an gasisolierte Systeme für Gleichspannungsanwendungen bewertet.

In jedem Fall sollte das beobachtete Phänomen, die Erhöhung der Leitfähigkeit durch Einbettung in eine Polymermatrix, zum Gegenstand weiterer Untersuchungen gemacht werden. Es wäre wünschenswert, die spezifische Grundleitfähigkeit nicht durch die Mischung mit der Isolierstoffmatrix zu erhöhen, noch zudem in unvorhersagbarer Weise. Hierdurch besteht ein Risiko zur Unterschätzung der spezifischen Grundleitfähigkeit, wenn das Design eines Isoliersystems nur anhand der Füllstoffdaten durchgeführt wird. In Abhängigkeit des Herstellers werden aber teilweise nur diese angegeben.

---

<sup>5</sup> Ermöglicht wurde dies durch die freundliche Unterstützung der Firma Merck.

**Tabelle 6.4.: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen an Pulverprüflingen unterhalb der Schaltfeldstärke**

Füllstoff (Nachbildung)	Eigenschaften des Füllstoffs	Ergebnisse	Messverfahren und Prüfbedingungen	Eignung für Feldsteuermaterialien
Mikrovaristoren Variante a (Gl. 6.3)	gesintertes Zinkoxid, sphärisch	$\kappa_0 = 4,7 \cdot 10^{-12} \text{ S/m}$ (bei 30 °C) $m_0 = 2,3 \text{ mm/kV}$ (bei 30 °C)	10-min-Messungen, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30 \text{ °C}$ ; $E = 0,05...0,5 \text{ kV/mm}$	nein, zu leitfähig
M-c-7	substratbasiert, planar	$\kappa = 9,9 \cdot 10^{-9} \text{ S/m}$ (bei 0,56 kV/mm) $\kappa = 9,9 \cdot 10^{-9} \text{ S/m}$ (bei 0,78 kV/mm)	Messung bis stat. Strom, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30 \text{ °C}$ ; $E = 0,56; 0,78 \text{ kV/mm}$	nein, zu leitfähig
M-c-9	substratbasiert, planar	$\kappa = 1,13 \cdot 10^{-9} \text{ S/m}$ (bei 0,63 kV/mm) $\kappa = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ S/m}$ (bei 0,88 kV/mm)	Messung bis stat. Strom, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30 \text{ °C}$ ; $E = 0,63; 0,88 \text{ kV/mm}$	nein, zu leitfähig
M-d-33 (Gl. 6.3)	substratbasiert, sphärisch	$\kappa_0 = 4,13 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$ (bei 30 °C) $m_0 = 0,14 \text{ mm/kV}$ (bei 30 °C)	Messung bis stat. Strom, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30 \text{ °C}$ ; $E = 0,13...1,13 \text{ kV/mm}$	nein, siehe Abschnitt 6.3
M-e-26	substratbasiert, sphärisch	$\kappa = 5,59 \cdot 10^{-7} \text{ S/m}$ (bei 0,1 kV/mm) Beginn der Messung, therm. Weglaufen	Messung abgebrochen, $RH < 3\%$ ; $\vartheta = 30 \text{ °C}$ ; $E = 0,1 \text{ kV/mm}$	nein, zu leitfähig
M-f-37	substratbasiert, sphärisch	instabiles Verhalten	Messung abgebrochen	nein
M-g-34	substratbasiert, sphärisch	instabiles Verhalten	Messung abgebrochen	nein
M-g-44	substratbasiert, sphärisch	instabiles Verhalten	Messung abgebrochen	nein

---

## 6.2 Messungen mit Spannungs- und Stromimpulsen

---

Die im Folgenden vorgestellten Messungen mit Impulsspannungen und -strömen dienen zwei Zwecken: In erster Linie soll mit ihrer Hilfe die  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie von Verbundstoffprüflingen im Durchbruchbereich und im Sättigungsbereich (Bereiche 2 und 3 der Kennlinie) ermittelt werden. Hierzu können keine Messungen mit Gleichspannung durchgeführt werden, da die hohe spezifische Leitfähigkeit in diesem Bereich zur Zerstörung der Prüflinge durch thermisches Weglaufen führen würde. Zudem stellen Stoßspannungsimpulse eine anwendungsnahe Belastung dar. Die Messungen mit dem Ziel der Kennlinienermittlung werden in Abschnitt 6.2.1 beschrieben.

Das zweite Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung der Grenzen der Belastbarkeit der hergestellten Verbundstoffe und die Analyse des Ausfallverhaltens (vgl. Abschnitt 6.2.2). Hierdurch soll die Frage beantwortet werden, welche Mechanismen zum Versagen von Feldsteuermaterialien führen, die für die Dauer eines Impulses eine hohe spezifische Leitfähigkeit annehmen können. Bisher ist nicht bekannt, ob der Einsatz dieser Art von Materialien einer spezifischen Begrenzung unterliegt, wie etwa einer maximal zulässigen Feldstärke, Stromdichte oder Leistungsdichte im Prüfling.

---

### 6.2.1 Ermittlung der Kennlinie im Durchbruch- und Sättigungsbereich

---

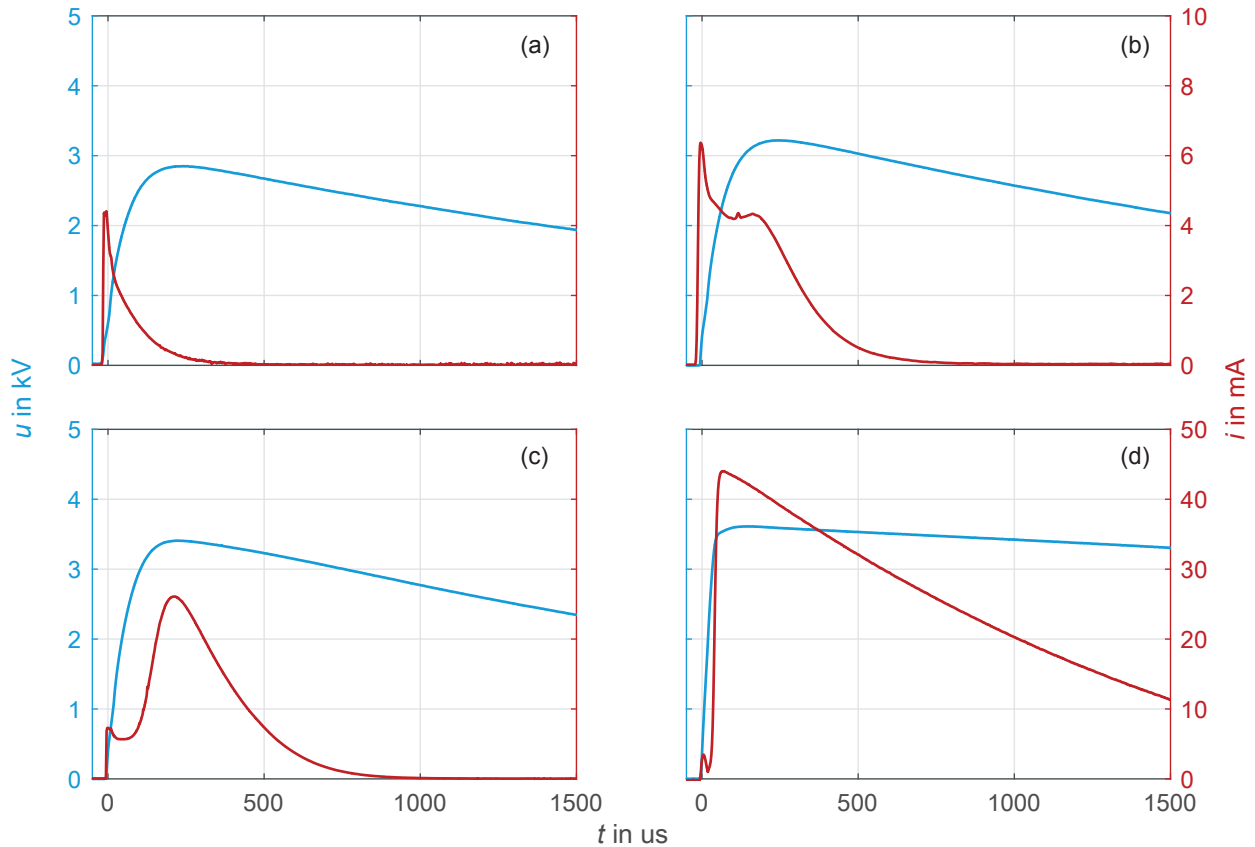
Die Ermittlung der Kennlinienpunkte wird nicht im Klimaschrank durchgeführt. Bei Varistoren der Ableitertechnik ist nach dem derzeitigen Stand des Wissens die Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit von der Temperatur oberhalb der Schaltfeldstärke nur schwach ausgeprägt [Tuc2015], [Sch1994]. Es wird davon ausgegangen, dass dies ebenfalls auf nichtlineare Feldsteuermaterialien zutrifft. Um einen weiten Kennlinienbereich zu erfassen, werden die Versuche mit der geringsten Ladespannung begonnen, die noch ein Triggern der Kugelfunkenstrecke zulässt. Diese liegt bei etwa 2,6 kV. Dabei wird mit der Impulsform mit der längsten Scheitelzeit begonnen.

Da das Ziel der Untersuchungen die Ermittlung einer *resistiven*  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie ist, wird die Ladespannung schrittweise gesteigert, bis sich eine überwiegend resistive Impulsantwort einstellt. Was dies bedeutet, ist in Abbildung 6.12 dargestellt: das Oszillogramm in Teil (a) der Abbildung zeigt einen Stromverlauf, dessen Maximum im Bereich der größten Steilheit des Spannungsverlaufs liegt. Der Prüfling zeigt bei dieser Prüfspannung demnach ein weitestgehend kapazitives Verhalten. Eine Steigerung der Prüfspannung führt zu den in Teil (b) und (c) dargestellten Stromverläufen, bei denen immer mehr ein zweites Maximum im Stromverlauf erkennbar wird. Durch eine weitere Steigerung der Ladespannung stellt sich der in Abbildung 6.12 (d) gezeigte Stromverlauf ein, bei dem das zweite Maximum zeitlich im Bereich des Spannungsmaximums liegt. Der Scheitelwert dieses resistiven Anteils der Impulsantwort ist zudem grob um Faktor zehn größer als der des kapazitiven Anteils. Damit wird das Ergebnis dieser Messung als Kennlinienpunkt übernommen (vgl. Abbildung 6.13). Diese Betrachtungen zeigen, warum mit der langsamsten Impulsform begonnen wird: Je schneller die Impulsform, desto höher fällt der kapazitive Anteil des Stromverlaufs aus und umso höher ist die benötigte Feldstärke, um eine resistive Impulsantwort zu erhalten.

Wie ebenfalls in Abbildung 6.12 (d) zu erkennen ist, kommt es bei einer resistiven Impulsantwort meist zu einer Verzerrung der Spannungsform. Tatsächlich stellen sich Leitfähigkeiten der Prüflinge ein,



die über dem Erwartungswert bei der Auslegung des Impulsgenerators liegen. Da zur reinen Charakterisierung der Prüflinge eine normgerechte Spannung nicht notwendig ist, kann der Versuchsaufbau jedoch beibehalten werden. Sobald der Spannungsausnutzungsgrad des Impulsgenerators nicht mehr ausreicht, um die Spannung weiter in sinnvollen Schritten zu erhöhen, wird die Impulsform mit der nächst-kürzeren Scheitelzeit gewählt.

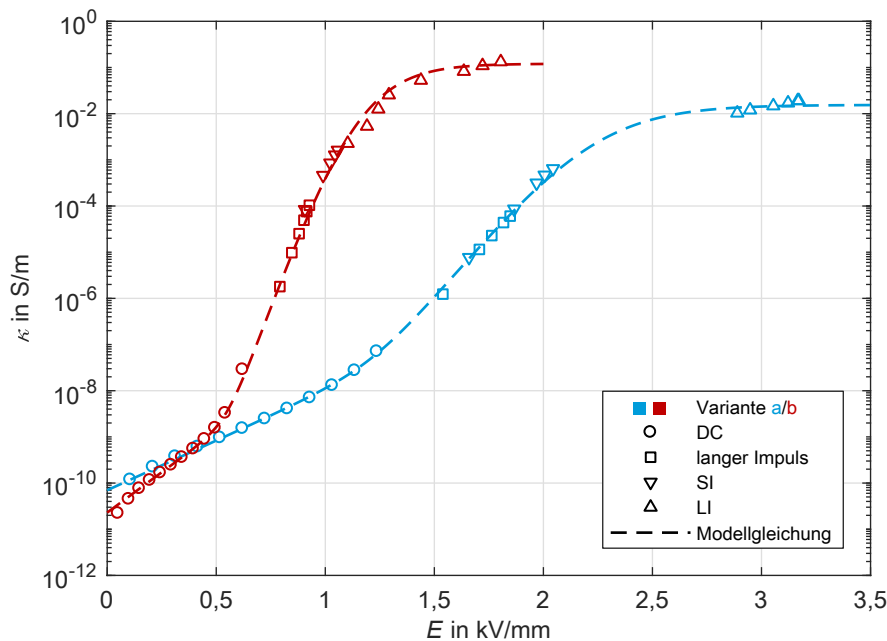


**Abbildung 6.12.:** Verläufe der Ströme und Spannungen über der Zeit während eines Schaltstoßspannungsimpulses (gemessen an Verbundstoffprüflingen aus Mikrovaristoren der Variante b), nach [Kem2017\*]; (a) weitestgehend kapazitives Verhalten; (b) u. (c) gemischt kapazitiv-resistives Verhalten; (d) resistives Verhalten

Sollte ein Feldsteuermaterial nach ersten Messungen geeignet für den Einsatz in einer Anwendung erscheinen, kann das Vorgehen leicht angepasst werden: In diesem Fall ist es sinnvoll, die Impulsform in Abhängigkeit der Prüffeldstärke so zu wählen, dass die in der Anwendung erwarteten Beanspruchungen nachgebildet werden. Der Grund hierfür wird gegen Ende des Abschnittes, im Kontext der Ermittlung der Permittivität, noch detaillierter diskutiert.

Die mittels des hier beschriebenen Verfahrens ermittelten Kennlinien sind in Abbildung 6.13 gezeigt (mit Markern in Form von Dreiecken und Quadraten dargestellt). Zusätzlich sind die durch Gleichspannungsmessungen (vgl. Abschnitt 6.1) gefundenen Kennlinienpunkte mit aufgenommen (mit Kreisen markiert). Beide Kennlinien lassen sich mittels der in Abschnitt 2.3.2 eingeführten Modellgleichung (vgl. Gleichung 2.6) gut nachbilden und weisen eine stark ausgeprägte Nichtlinearität der Leitfähigkeit auf. Dies wird besonders deutlich bei Betrachtung der Steigung der Nichtlinearität,  $m_{\mu Var,a} = 5,7 \text{ mm/kV}$

und  $m_{\mu\text{Var},b} = 13,1 \text{ mm/kV}$ , und des Wertebereichs für den Nichtlinearitätsexponenten, der gut mit Werten aus der Literatur übereinstimmt. Er liegt bei den hier untersuchten Mikrovaristorverbundstoffen bei  $\alpha_{\mu\text{Var},a} \leq 21,6$ , respektive  $\alpha_{\mu\text{Var},b} \leq 23,9$  und damit im Bereich der bisher dieser Materialklasse zugeordneten Werten von etwa 20...30 [Don2011]. Für den Verbundstoff aus den Mikrovaristoren der Variante a umfasst die spezifische Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Feldstärke dabei mehr als acht Größenordnungen, und für den aus Variante b sogar mehr als neun Größenordnungen. Alle Parameter der Kurvennachbildung mittels Gleichung 2.6 sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst.



**Abbildung 6.13.:**  $\kappa$ - $E$ -Kennlinie der Verbundstoffe aus den Mikrovaristoren der Variante a (blau) und b (rot); die mittels Gleich- und Impulsspannungsmessungen gewonnenen Datenpunkte sind mit entsprechenden Markern eingetragen, die Anpassungsfunktionen nach der Modellgleichung 2.6 sind strichliert dargestellt, nach [Kem2017\*]

**Tabelle 6.5.:** Ermittelte Parameter zur Nachbildung der Kennlinien der untersuchten Mikrovaristorverbundstoffe mittels Gleichung 2.6

Parameter	Variante a	Variante b
$\kappa_0$	$7 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$	$2,3 \cdot 10^{-11} \text{ S/m}$
$m_0$	2,15 mm/kV	3,5 mm/kV
$E_1$	1,23 kV/mm	0,55 kV/mm
$E_2$	2,23 kV/mm	1,145 kV/mm
$m$	5,7 mm/kV	13,1 mm/kV
$N_1$	1	1
$N_2$	0,35	0,23
$\alpha$	21,6	23,9

Beim Vergleich mit den in Kapitel 4 ermittelten Anforderungen fällt auf, dass beide Materialien nicht für den Einsatz in gasisolierten Gleichspannungsisoliersystemen für 500 kV geeignet sind. Die Schaltfeld-

stärke  $E_1$  liegt in beiden Fällen deutlich unterhalb des ermittelten Minimums von 2,3 kV/mm. Hierdurch und durch die bereits relativ hohe Nichtlinearität unterhalb der Schaltfeldstärke ergibt sich eine deutlich zu hohe spezifische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke. Allerdings konnte am Beispiel der verfügbaren Mikrovaristoren gezeigt werden, dass sich mit den hier beschriebenen Methoden eine Charakterisierung und Beschreibung von Feldsteuermaterialien über einen weiten Feldstärkebereich durchführen lässt. Gerade die Sättigungsfeldstärke und -leitfähigkeit haben bisher kaum Beachtung gefunden. Vergleicht man die gefundenen Parameter mit den Anforderungen an Kabelmuffen für Gleichspannungskabel (vgl. [Sec2017a], [Hus2017]), so zeigt sich, dass Variante a hier durchaus geeignet ist. Allerdings liegt auch hier die spezifische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke eher an der oberen Grenze des zulässigen Auslegungsspielraumes. Zudem kann der Innenleiter eines VPE-Kabels Betriebstemperaturen von bis zu 90 °C annehmen, wodurch auch die Isolation und das Feldsteuermaterial bei entsprechend erhöhter Temperatur betrieben werden.

Neben den Mikrovaristorverbundstoffen werden auch die Verbundstoffe untersucht, die aus den substratbasierten Füllstoffen hergestellt wurden. Wie mittels der in Abschnitt 6.1 durchgeführten Gleichspannungsmessungen gezeigt wurde, weisen die zur Verfügung stehenden Materialien bis zu Feldstärken von 4 kV/mm nur eine moderate Nichtlinearität auf. Diese Ergebnisse werden durch stichprobenartige Messungen mit Impulsspannungen bestätigt. Auch bei Feldstärken von bis zu 12 kV/mm kann kein messbarer resistiver Strom durch die Prüflinge erzeugt werden. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die bisher zur Verfügung stehenden substratbasierten Füllstoffe entweder keinen Schalterpunkt aufweisen, oder dieser deutlich über der Schaltfeldstärke liegt, die für den Einsatz eines Feldsteuermaterials in Gleichspannungsisoliersystemen für 500 kV wünschenswert wäre. Auf eine ausführliche Untersuchung der Verbundstoffe aus substratbasierten Füllstoffen mittels dieser Methode wird daher verzichtet.

**Tabelle 6.6.:** Aus den Strom- und Spannungsverläufen in Abbildung 6.12 ermittelte Permittivität eines Verbundstoffprüflings (aus Mikrovaristoren der Variante b)

Prüflingsverhalten	$\epsilon_r$
kapazitiv (vgl. Abb. 6.12 (a))	53,5
weitestgehend kapazitiv (vgl. Abb. 6.12 (b))	38,5
gemischt kapazitiv-resistiv (vgl. Abb. 6.12 (c))	33,7
resistiv (vgl. Abb. 6.12 (d))	17,9

Aus den zeitlichen Verläufen von Strom und Spannung lässt sich neben den Datenpunkten für die resistive Kennlinie auch die Permittivität der Prüflinge bestimmen. Dies wird exemplarisch anhand der in Abbildung 6.12 gezeigten Verläufe durchgeführt. Hierzu wird das erste Maximum des Stromverlaufs ermittelt und die Steigung der Spannung in diesem Punkt ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst. Die relative Permittivität des Prüflings liegt zwischen 17,9 und 53,5. Die kleineren Werte werden dabei bei den Verläufen die ein resistives Verhalten aufweisen festgestellt. Im Gegensatz dazu lässt sich durch eine Messung mittels dielektrischer Spektroskopie an diesem Verbundstoff über den gesamten Frequenzbereich von Interesse eine relative Permittivität von  $\epsilon_r = 30 \dots 35$  feststellen. Dies ist ein klarer Indikator dafür, dass die Permittivität des Prüflings weniger von der Frequenz als vielmehr vom Grad der Aussteuerung des Materials abhängt.

---

Damit weist die Ermittlung der Permittivität aus den Impulsspannungsversuchen gegenüber der dielektrischen Spektroskopie einen Vorteil auf: die Messung findet bei betriebsrelevanten Feldstärken und Frequenzen statt. Dies setzt natürlich voraus, dass der Bereich der Kennlinie um  $E_{LI}$  auch mit Blitzstoßspannungsimpulsen ermittelt wurde und entsprechend der Bereich um  $E_{SI}$  mit Schaltstoßspannungsimpulsen.

Abschließend wird geprüft, ob die impulsförmige Belastung der Prüflinge zu einer Veränderung der Gleichstromleitfähigkeit führt (sofern es nicht zu einer Zerstörung der Prüflinge kam, vergleiche hierzu den folgenden Abschnitt). Da die Ströme bei der Bestimmung von Kennlinienpunkten im Scheitel bis zu mehr als 200 A betragen, können irreversible Veränderungen nicht ausgeschlossen werden. Hierzu wird die in Abschnitt 6.1 durchgeführte Kennlinienbestimmung mittels Gleichspannung an einem mit mehr als 100 Impulsspannungsmessungen belasteten Prüfling stichprobenartig wiederholt. Die Abweichung in den ermittelten Leitfähigkeitswerten beträgt dabei maximal 17,2 %, in den meisten Kennlinienpunkten jedoch weniger als 10 %. Die spezifische Leitfähigkeit hat sich in jedem Punkt der Gleichspannungskennlinie erhöht. Damit liegt ein Hinweis darauf vor, dass die Impulsbelastung eine Kennlinienalterung bewirkt. Diese stellt kein Ausschlusskriterium für den Einsatz nichtlinearer Feldsteuermaterialien in Gleichspannungsanwendungen dar, da die Veränderung der spezifischen Leitfähigkeit im Vergleich zu gängigen Sicherheitsmargen gering ausfällt (vgl. Kapitel 4), sollte aber bei der Auslegung berücksichtigt werden.

---

### 6.2.2 Ermittlung der Belastbarkeit bei impulsförmiger Beanspruchung

---

Wird die Ladespannung weiter erhöht, als dies zum Erfassen der Sättigungsfeldstärke nötig ist, kommt es zur Zerstörung der Prüflinge. Die Ausfälle treten dabei nicht nur an den Stellen der Prüflinge auf, die als typische Schwachpunkte augenfällig wären: der Rand der Elektroden aus Silberleitlack und die Mitte des Prüflings, die herstellungsbedingt manchmal dünner ausfällt als der übrige Prüfkörper. Daher wird eine systematischere Untersuchung des Ausfallverhaltens angestrebt.

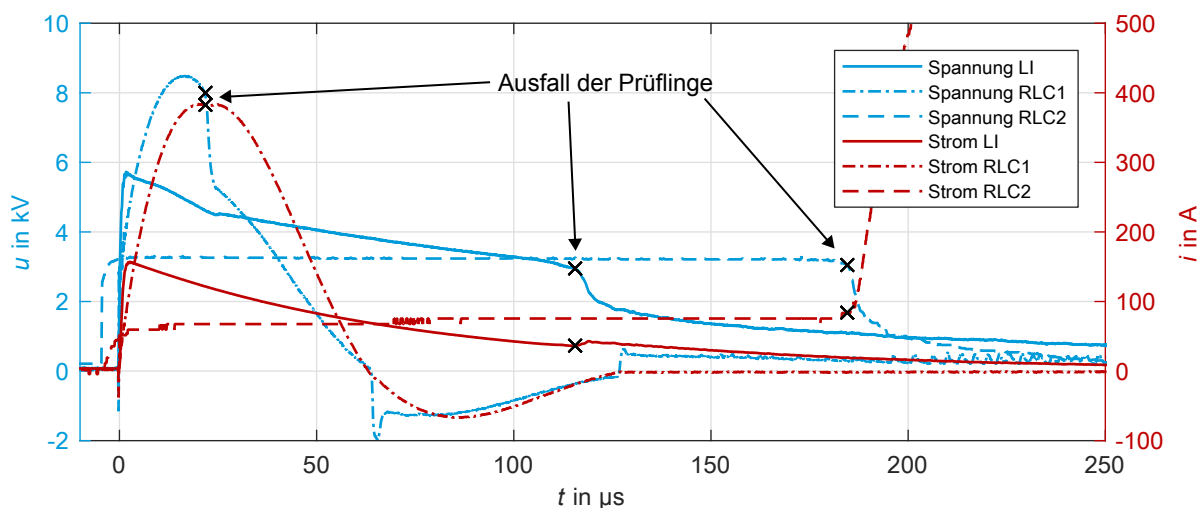
Hierzu werden die Verbundstoffprüflinge mit verschiedenen Impulsformen überlastet. Es kommt der in Anhang A.2 beschriebene Impulsgenerator in der Beschaltung für Blitzstoßspannung (siehe Verläufe mit der Bezeichnung  $LI$  in Abbildung 6.14) und umgebaut zum  $RLC$ -Kreis ( $RLC1$  in Abbildung 6.14) zum Einsatz. Mit den Beschaltungen für die Schaltstoßspannung oder den langsamen Impuls ist eine Zerstörung der Prüflinge nicht möglich. Für eine zusätzliche Stichprobe wird ein Versuchsstand eingesetzt, der für Versuche mit Metalloxidvaristoren aus der Ableitertechnik vorgesehen ist. Dieser ist ebenfalls als  $RLC$ -Schwingkreis mit den folgenden Parametern aufgebaut:  $C_S = 650 \mu F$ ;  $R_D = 4,2 \Omega$ ;  $L = 31 \mu H$ . Durch die große Kapazität wird durch diesen Impulskreis in Mikrovaristorprüflingen annähernd ein Rechteckimpuls erzeugt ( $RLC2$  in Abbildung 6.14).

In Abbildung 6.14 sind die Strom- und Spannungsverläufe dreier Überlastungsversuche, bei denen es jeweils zur Zerstörung des Prüflings kam, einander gegenübergestellt. Die Zeitpunkte der Ausfälle lassen sich am besten in der Unstetigkeit der Spannungsverläufe erkennen und sind in der Abbildung markiert. Beim Vergleich der Verläufe fallen die folgenden Phänomene auf:

- Der Ausfall der Prüflinge ereignet sich meist nach dem Scheitel des Strom- respektive Spannungsverlaufs.

- Die absoluten Werte von Strom und Spannung im Moment des Ausfalls unterscheiden sich signifikant. Die Spannweite der Spannung liegt dabei zwischen 3...8 kV, die des Stroms zwischen 20...380 A.
- Die Ausfallzeit weist ebenfalls eine Abhängigkeit von der Stoßform auf.

Bei zusätzlicher Betrachtung der in den Prüflingen über der Zeit umgesetzten Leistung fällt auf, dass die Ausfälle selten mit dem Moment des höchsten Leistungsumsatzes korrelierten. Je nach verwendeter Impulsform werden kurzzeitig bis zu 3 MW in den Prüflingen umgesetzt.

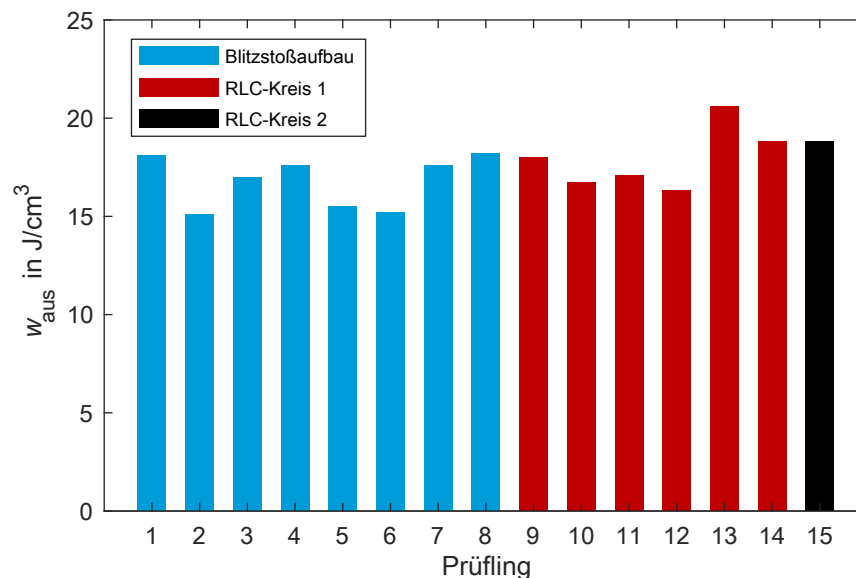


**Abbildung 6.14.:** Verläufe von Strom (rot) und Spannung (blau), der Ausfall der Verbundstoffprüflinge ist markiert, nach [Kem2017\*]

Als weitere Auswertung wird die in den Prüflingen umgesetzte Energie ermittelt. Dies geschieht durch die Integration der in den Prüflingen bis zum Ausfall umgesetzten Verlustleistung über der Zeit. Aus der Literatur zu Metalloxidvaristoren der Ableitertechnik ist bekannt, dass die in einem Impuls umgesetzte Energie in einem Prüfling eine kritische Größe darstellt. Diese Energie wird auf das Volumen des Prüflings bezogen und als *spezifisches Energieaufnahmevermögen* bezeichnet [Tuc2015]. Hier wird analog vorgegangen und die bis zum Ausfall umgesetzte Energie ermittelt und auf das Volumen bezogen. Dabei wird die Untersuchung auf das Energieaufnahmevermögen während eines Einzelimpulses beschränkt. Dies bedeutet, dass die Prüflinge zwischen den Impulsen abkühlen können und die Integration der Verlustleistung nur über die Dauer des Impulses durchgeführt wird, der zum Ausfall des Prüflings führt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.15 zusammengefasst. Die Versuchskreise werden durch unterschiedliche Balkenfarben repräsentiert. Aus Gründen der Verfügbarkeit konnte eine größere Versuchsreihe nur an Verbundstoffprüflingen aus Mikrovaristoren der Variante b durchgeführt werden.

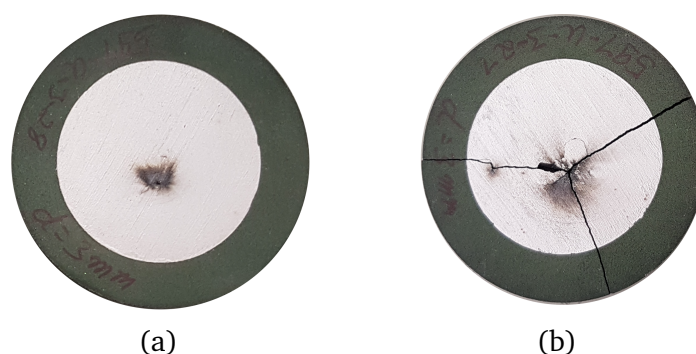
Unabhängig von der Impulsform liegen die Ergebnisse der bis zum Versagen in den Prüflingen umgesetzten spezifischen Energiedichte nah beieinander. Der Stichprobenumfang von 15 Prüflingen ist zu gering, um größere statistische Auswertungen zu ermöglichen, allerdings streuen die Ergebnisse nur um maximal 18,4 % um den Mittelwert von  $17,4 \text{ J/cm}^3$  und liegen damit deutlich näher beieinander als die Werte von Stromdichte, Feldstärke oder Leistungsdichte im Moment des Ausfalls. Dies ist ein Hinweis darauf, dass auch bei nichtlinearen Feldsteuermaterialien das Energieaufnahmevermögen eine

kritische Größe darstellt. Die hier erzielten Werte liegen dabei deutlich unter denen von Varistoren aus der Ableitertechnik (je nach Impulsform mehrere  $100 \text{ J/cm}^3$  bis zu über  $1000 \text{ J/cm}^3$ , vgl. [Tuc2015], [Cig2013], [Cig2017]). In Folgearbeiten sollte dieses Verhalten näher untersucht werden. So besteht bei Varistoren der Ableitertechnik eine Abhängigkeit des Energieaufnahmevermögens von der Stromdichte während des Impulses. Es ist denkbar, dass dieser Effekt auch hier existiert, aber aufgrund der geringen Stichprobenanzahl bisher nicht ersichtlich wurde.



**Abbildung 6.15.:** In den untersuchten Prüflingen aus Mikrovaristorverbundstoff (Mikrovaristoren der Variante b) bis zum Ausfall umgesetzte Energie, bezogen auf das Prüflingsvolumen; die verwendeten Versuchsaufbauten sind farblich unterschieden

Während der zerstörenden Prüfungen treten zwei Ausfallmechanismen zutage: Einerseits der punktuelle Durchschlag des Prüflings (engl.: *puncture*), andererseits das Zersplittern des Prüflings in zwei oder mehr Fragmente (engl.: *cracking*). Beide Ausfallmechanismen sind aus der Varistorliteratur bekannt [Tuc2015]. In Abbildung 6.16 sind die beiden Schadensbilder einander gegenübergestellt.



**Abbildung 6.16.:** Ausfallmechanismen von Mikrovaristorverbundstoffen, (a) punktueller Durchschlag (engl. *puncture*), (b) Zersplittern des Prüflings (engl. *cracking*), [Kem2017\*]

Das Ausfallverhalten scheint im vorliegenden Fall hauptsächlich durch den gewählten Impulskreis bestimmt worden zu sein. So treten Ausfälle der Form *cracking* nur bei den *RLC*-Kreisen auf, die aufgrund

---

ihres geringeren Innenwiderstands in der Lage sind, eine höhere Leistung im Prüfling umzusetzen. Dies legt den Verdacht nahe, dass es sich in diesen Fällen ebenfalls um einen Ausfall in Form eines *punctures* handelte, jedoch durch die jeweiligen Impulskreise ein hoher Strom durch den nun leitfähigen Durchschlagskanal getrieben wurde. Auf eine weitere Interpretation der Ausfallmechanismen wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Aus den hier zusammengefassten Untersuchungen folgt, dass ein potentiell nichtlineares Feldsteuermaterial vor dem Einsatz in jedem Fall hinsichtlich seines Energieaufnahmevermögens zu prüfen ist. Wie in Abschnitt 4.3.2 ermittelt wurde, können sich in Abhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit bei  $E_{LI}$  örtlich sehr hohe spezifische Energieumsätze ergeben. Der Mittelwert der Ausfallenergiedichte  $w_{aus} = 17,4 \text{ J/cm}^3$  für das aus Variante b hergestellte Feldsteuermaterial liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit nah an der mittleren Ausfallenergie  $w_{aus50}$ . Ein für den Einsatz in Frage kommendes Material sollte jedoch so eingesetzt werden, dass der maximal auftretende Energieumsatz weit unterhalb der spezifischen Energiedichte liegt, die mit Sicherheit *nicht* zu einem Ausfall des Materials führt:  $w_{aus0}$ . In der Ableitertechnik wird typischerweise eine Auslegungsenergiedichte  $w_{design}$  gewählt die drei bis fünf mal kleiner ist als  $w_{aus50}$ . Diese Sicherheitsmarge erscheint auch bei nichtlinearen Feldsteuermaterialien sinnvoll.

Für den hier untersuchten Mikrovaristorverbundstoff ergibt sich damit eine Auslegungsenergiedichte zwischen  $3,5$  und  $5 \text{ J/cm}^3$ , welche über die Dauer eines Impulses in keinem Teilbereich des Feldsteuermaterials überschritten werden darf. Dies würde den Anforderungen des in Abschnitt 4.3 ausgelegten Feldsteuermaterials genügen. Damit scheint diese Größe kein Ausschlusskriterium zu sein, welches den Einsatz stark nichtlinearer Feldsteuermaterialien in Isoliersystemen für gasisolierte Gleichspannungssysteme für  $500 \text{ kV}$  generell verbietet. Gleichzeitig wird dadurch allerdings aufgezeigt, dass die Ansprüche an nichtlineare Feldsteuermaterialien in Hochfeldsystemen an der Grenze der Leistungsfähigkeit der heute verfügbaren Materialien liegen. Zudem ist zu erwarten, dass der Wert materialabhängig ist. Dies unterstreicht die Relevanz einer Validierung der Auslegung mit den Materialparametern des fertigen Feldsteuermaterials.

Noch ist unbekannt, ob das spezifische Energieaufnahmevermögen Volumeneffekten unterliegt. Hierzu sollten in zukünftigen Arbeiten Prüflinge unterschiedlicher Größe untersucht werden.

---

### 6.3 Diskussion der untersuchten Füll- und Verbundstoffe

---

Parallel zur Weiterentwicklung der Messmethoden sollen möglichst viele derzeit am Markt erhältliche und im Prototypenstadium befindliche Füllstoffe und daraus hergestellte Verbundstoffe untersucht werden. Hierdurch soll die Frage geklärt werden, ob bzw. welche der Materialien für den Einsatz in gasisolierten Isoliersystem geeignet sind, oder dazu ertüchtigt werden können. Für einzelne Materialien kann die Frage bereits durch das Betrachten der in den vorangegangenen Kapiteln gezeigten Ergebnisse der elektrischen Messungen beantwortet werden. Im Folgenden werden ergänzend Aspekte der Materialwissenschaft und der Verarbeitungstechnik betrachtet und hierdurch aufgezeigt, welche Potentiale in der Weiterentwicklung der untersuchten Materialien stecken. Wie bereits in der Übersicht über die untersuchten Füllstoffe (vgl. Abschnitt 5.1) werden auch hier die Zusammensetzungen der Füllstoffpartikel soweit wiedergegeben, wie dies unter Wahrung von Betriebsgeheimnissen vertretbar ist.



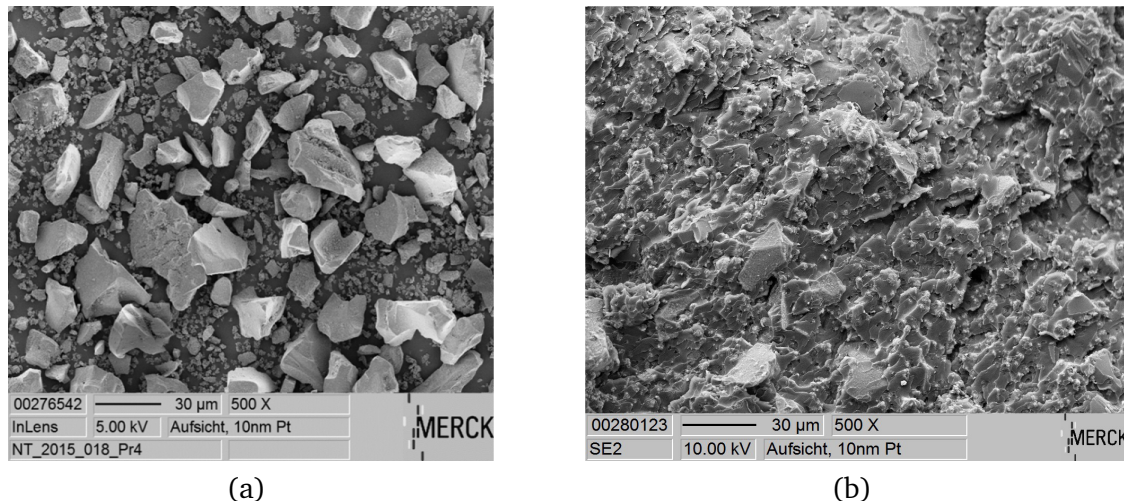
Die erste im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Materialklasse bilden die Verbundstoffe auf Basis der Füllstoffe MFF2, E12b und E14b. Bei diesen handelt es sich um eine Weiterentwicklung des bereits am Fachgebiet untersuchten Füllstoffes Minatec<sup>®</sup> SCM E12 (später Teil der Iriotec<sup>®</sup>-Produktreihe der Firma Merck). Bei den Messungen an Verbundstoffen aus diesem Füllstoff zeigten sich teilweise inhomogene Verteilungen der spezifischen Leitfähigkeit im Volumen der Prüflinge [Ten2015]. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass der Füllstoff keine gute Dispergierbarkeit aufwies. Mit den Füllstoffen MFF2, E12b und E14b wird der Ansatz verfolgt, die Dispergierbarkeit durch eine Veränderung der Partikelbeschichtung zu verbessern. Hierzu wird im Fall von E14b Titandioxid anstelle von Zinnoxid in der Beschichtung eingesetzt. Das Material E12b unterscheidet sich von Minatec<sup>®</sup> SCM E12 durch eine thermische Nachbehandlung. Beide Maßnahmen zielen auf eine Reduktion der Reaktivität der Oberfläche ab. Hierdurch soll eine unkontrollierte Beschleunigung der Aushärtung des Epoxidharzes während des Mischens verhindert und damit die Verarbeitbarkeit verbessert werden. Die Beschichtung von MFF2 besteht ebenfalls zu großen Teilen aus Titandioxid, zusätzlich wird dieser Füllstoff vor der Einmischung silanisiert. In allen Fällen kommt weiterhin Glimmer als Substrat zum Einsatz. Durch die beschriebenen Maßnahmen wird eine verbesserte Dispergierbarkeit erreicht: Bei keinen aus den Füllstoffen MFF2, E12b und E14b hergestellten Prüflingen lassen sich Effekte feststellen, die mit denen bei Nutzung von Minatec<sup>®</sup> SCM E12 vergleichbar sind.

Aus elektrischer Sicht sind die Weiterentwicklungen sowohl untereinander als auch mit dem Vorgängermaterial vergleichbar: Sie zeigen eine geringe spezifische Grundleitfähigkeit bei moderater Nichtlinearität und moderater bis geringer Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit. Die geringe spezifische Grundleitfähigkeit wirft den Verdacht auf, dass die Perkolationsschwelle im Material nicht überschritten wird und die gegenüber einem klassischen Isolierstoff erhöhte spezifische Leitfähigkeit das Resultat von verbesserter Haftstellenleitung oder von Interphaseneffekten darstellt. Dies ist als nachteilig zu bewerten, da die spezifische Leitfähigkeit hiermit nicht das Ergebnis einer gezielten Einstellung ist. Trotzdem würden sich diese Füllstoffe zur Feldsteuerung nach der Methode der *Reduktion der Ladungsträgeransammlung* anbieten. Ein definierter Schaltpunkt ist im Rahmen der durchgeführten Messungen nicht feststellbar.

Um eine weitere Verbesserung der Verarbeitbarkeit zu erzielen, werden Versuche mit unterschiedlichen Substratformen durchgeführt. Dieser Ansatz ist zielführender, da die Anpassung der Beschichtung vorrangig mit dem Ziel der Modifikation der elektrischen Eigenschaften durchgeführt werden sollte. Da die planaren Substrate im Verdacht stehen, die Bildung anisotroper Materialeigenschaften zu begünstigen, werden Versuche mit unregelmäßig und sphärisch geformten Füllstoffpartikeln unternommen. Hieraus resultieren unter anderem die Füllstoffe M-b-5, M-b-05 und M-b-005, die alle auf einem unregelmäßig geformten Substrat basieren und sich in ihrer Beschichtung unterscheiden. Eine exemplarische REM-Aufnahme ist in Abbildung 6.17 (a) gezeigt<sup>6</sup>. Im Vergleich zu den planaren Partikeln (vgl. Abbildung 2.12 (a), Kapitel 2) fällt das deutlich geringere Aspektverhältnis auf. Zusätzlich sind REM-Aufnahmen von der Bruchkante eines Verbundstoffprüflings aus M-b-05 in Abbildung 6.17 (b) dargestellt. Obwohl der Anteil des Füllstoffes so hoch gewählt ist, dass eine Verarbeitung gerade noch möglich ist, geben die Aufnahmen Hinweise darauf, dass die Perkolationsschwelle nicht erreicht wird. Die im Ver-

<sup>6</sup> Die in diesem Kapitel gezeigten REM-Aufnahmen wurden freundlicherweise von Herrn Dr. Johann Bauer und dem Merck-REM-Team erstellt und zur Verfügung gestellt. Ebenso wurden die hier beschriebenen substratbasierten Füllstoffe durch die Firma Merck zur Verfügung gestellt.

bundstoff sichtbaren Füllstoffpartikel berühren einander nicht. Die elektrische Charakterisierung steht dieser These nicht entgegen, da auch hier nur eine geringe spezifische Leitfähigkeit festgestellt wird. Eine weitere Beobachtung von Interesse ist, dass die Beschichtung offensichtlich nicht ausreichend robust ist. Diese löst sich in Teilen vom Substrat und findet sich in Form der kleineren hellen Objekte zwischen den eigentlichen Füllstoffpartikeln. Anscheinend lässt sich mittels des Fällprozesses ohne weitere Modifikation nicht auf jeder Oberfläche eine ausreichend haftende Beschichtung erzielen. Da die Ablösung der Beschichtung eine Unwägbarkeit im Fertigungsprozess darstellt, ist der Einsatz dieser Füllstoffart für Isoliersysteme nicht zu empfehlen.

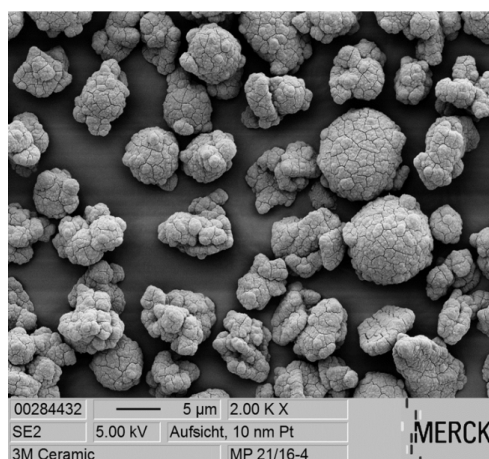


**Abbildung 6.17.:** Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (a) unverarbeiteter Füllstoff M-b-05, (b) Verbundstoff aus M-b-05 und Epoxidharz (Bruchkante)

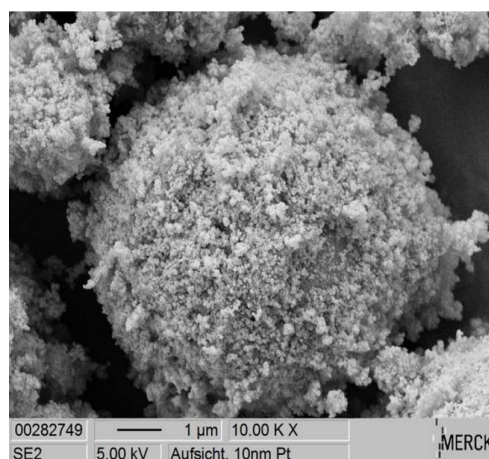
Eine Abhilfemaßnahme kann die Nutzung eines Haftvermittlers darstellen, der als zusätzliche Schicht zwischen Substrat und Beschichtung eingebracht wird. Die erste Generation des Haftvermittlers kommt bei den Füllstoffen M-b-27 und M-e-26 zum Einsatz. Wie in Abbildung 6.18 (a) am Beispiel von M-e-26 zu sehen ist, führt der Einsatz des Haftvermittlers zur Bildung einer kompakten, robust wirkenden Beschichtung. Beide aus diesen Materialien hergestellten Verbundstoffe weisen sehr hohe spezifische elektrische Leitfähigkeiten auf. Die Verarbeitbarkeit der Füllstoffe ist demnach gut genug, um einen perkolierenden Verbund herstellen zu können. Gleichzeitig kommt es nicht zu einer Ablösung der Beschichtung. Allerdings sind die erzielten spezifischen Leitfähigkeiten auch zu hoch für den Einsatz in Isoliersystemen für gasisolierte Gleichspannungssysteme für 500 kV (vgl. Abschnitt 4.2). Das Ergebnis ist unerwartet, da die Beschichtung ohne den Haftvermittler vom Hersteller bereits erprobt ist und typischerweise geringere spezifische Leitfähigkeiten aufweist. Die signifikante Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit wird damit auf den Haftvermittler zurückgeführt.

Mit den Füllstoffen M-e-26, M-d-33, M-f-37, M-g-34 und M-g-44 werden sphärische Substrate getestet. Die Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Resultate sind in Abbildung 6.18 zusammengefasst (mit Ausnahme von M-g-44). Sphärische Partikel sind aufwendiger in der Herstellung, weisen aber einige Vorteile auf: Sie zeigen meist ein gutes Fließverhalten und resultieren auch bei hohen Volumenkonzentrationen in vergleichsweise gut verarbeitbaren Matrixmaterial-Füllstoff-Mischungen. Weiterhin existiert bereits ein breites Wissen in Bezug auf das Perkulationsverhalten spärlicher Partikel, vgl. [Sah1994]. Bei

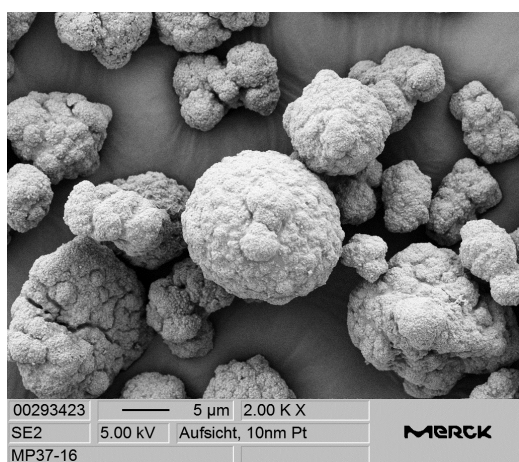
der Verarbeitung der hier vorliegenden sphärischen Füllstoffe fällt die geringe Dichte auf. Diese wurde mittels Gaspyknometrie<sup>7</sup> an drei Füllstoffen bestimmt: M-f-37: 2,9 g/cm<sup>3</sup>; M-g-34: 1,25 g/cm<sup>3</sup>; M-g-44: 1,29 g/cm<sup>3</sup>. Die Verarbeitbarkeit ist bei allen untersuchten sphärischen Füllstoffen sehr gut. Sie lassen sich mit einem Volumenanteil von 42 % in die Epoxidharzmatrix einmischen, wodurch die Perkolationsschwelle überschritten wird. Gleichzeitig ist der Verbundstoff vor der Vernetzung noch fließfähig und für einen Verguss geeignet. Nur im Fall von M-d-33 konnte dieser Aspekt nicht untersucht werden, da die vorhandene Pulvermenge für einen Verguss nicht ausreichend war.



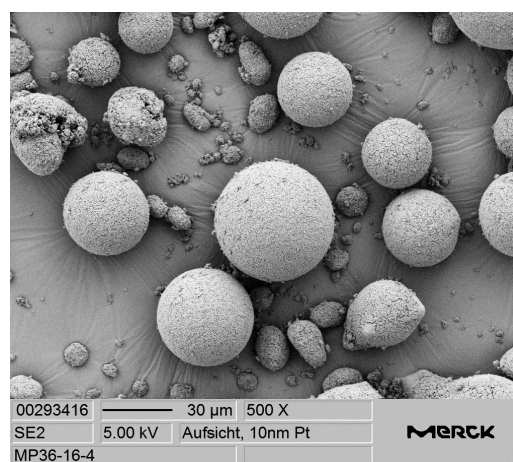
(a)



(b)



(c)



(d)

**Abbildung 6.18.:** Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (a) M-e-26, (b) M-d-33, (c) M-f-37, (d) M-g-34

Die sphärischen Partikel unterscheiden sich untereinander signifikant in ihren elektrischen Eigenschaften, was auf ihre Herstellung zurückführbar ist. Wie bereits diskutiert, führt der Einsatz des Haftvermittlers beim Füllstoff M-e-26 zu einer unerwünschten Erhöhung der spezifischen Leitfähigkeit. Beim Füllstoff M-d-33 kommt dieser Haftvermittler nicht zum Einsatz. Hierdurch wird zwar eine spezifische Leitfähigkeit (der Pulverprobe) im interessanten Bereich erzielt, allerdings führt dies auch zu einer wenig robusten Beschichtung und einem erheblichen Anteil an Nebenfällung, wie Abbildung 6.18 (b) entnommen werden kann. Daher wird für die Herstellung der Füllstoffe M-f-37, M-g-34 und M-g-44 ein modi-

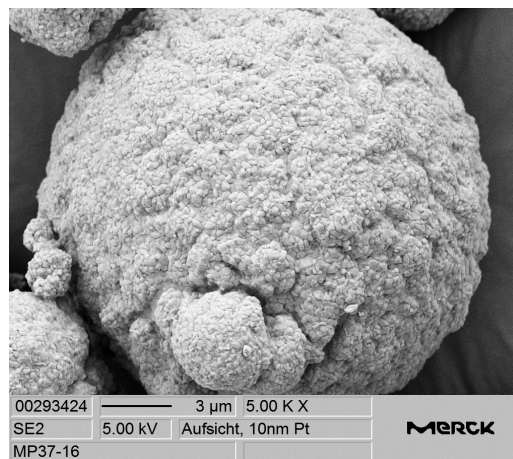
<sup>7</sup> An dieser Stelle sei Frau Gabriela Schubert und Herrn Christoph Drefke vom Institut für angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt für die Messungen gedankt.



fizierter Haftvermittler eingesetzt. Mit diesem kann eine zufriedenstellende Qualität der Beschichtung erzielt werden (vgl. Abbildung 6.18 (c) und (d)). Allerdings ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht eindeutig geklärt, ob das instabile elektrische Verhalten eine Folge des neuen Haftvermittlers oder der derzeit in der Entwicklung befindlichen Beschichtung ist. Während die Erfahrungen mit den neuen Substraten eine gute Basis für die Entwicklung neuer Füllstoffe bilden, sind die Füllstoffprototypen M-f-37, M-g-34 und M-g-44 noch nicht für den Einsatz geeignet.

Die Füllstoffe M-c-7 und M-c-9 basieren auf planaren Substraten aus Aluminiumoxid. Das mit diesen Füllstoffen verfolgte Ziel ist die Herstellung eines Verbundstoffes mit hoher Wärmeleitfähigkeit. Durch die Nutzung eines veränderten Herstellungsverfahrens (zum Einsatz kommt ein *Hauschild Vakuum-SpeedMixer<sup>TM</sup>*) lassen sich auch mit planaren Partikeln Verbundstoffe herstellen, in denen die Perkolationsschwelle überschritten wird. Auch hier zeigen die Verbundstoffe höhere spezifische Leitfähigkeiten als die Pulverproben der Ausgangsmaterialien. Damit wird dieses bereits bei Mikrovaristorverbundstoffen (vgl. Abschnitt 6.1.2) festgestellte Phänomen reproduziert. Dies bestätigt die Aussage, dass Messungen am Verbundstoff nicht durch Pulvermessungen zu ersetzen sind. Beide Verbundstoffe sind zu leitfähig, um in Isoliersystemen für gasisolierte Gleichspannungssysteme für 500 kV zum Einsatz zu kommen.

Die beiden im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Mikrovaristorvarianten<sup>8</sup> erweisen sich ebenfalls als zu leitfähig für den geplanten Einsatz (vgl. Abschnitt 6.2.1). Weiterhin weisen sie eine deutlich zu geringe Schaltfeldstärke auf. Vor der Vernetzung ist der Verbundstoff vergussfähig, die Verarbeitbarkeit ist demnach ausreichend. Die hohe Dichte der Partikel führt jedoch zu einem Absetzen der Partikel in den Vergussformen. Für potentielle Anwendungen muss dies bedacht und ein entsprechendes Vergussverfahren gewählt werden.



**Abbildung 6.19.:** Rasterelektronenmikroskopaufnahme von M-f-37, ein Korn der Beschichtung weist einen Durchmesser von deutlich unter einem Mikrometer auf

Ein möglicher Ansatz zur Weiterentwicklung sowohl der substratbasierten Füllstoffe als auch der Mikrovaristoren leitet sich aus den erzielten Schaltfeldstärken ab: Die Kennlinien der substratbasierten Füllstoffe zeigen keine definierte Schaltfeldstärke. Bei Betrachtung der Rasterelektronenmikroskopaufnahmen, beispielsweise von M-f-37 (vgl. Abbildung 6.19), fällt auf, dass etwa vier Körner auf eine Strecke von einem Mikrometer fallen. Geht man in einer ersten Näherung davon aus, dass der Schaltpunkt je

<sup>8</sup> Die beiden Mikrovaristorvarianten wurden freundlicherweise von der Firma ABB durch Herrn Michael Hagemeister zur Verfügung gestellt.

Korngrenze bei ca. 3,3 V liegt, wie bei Mikrovaristoren der Fall (vgl. Abschnitt 2.2.2), ergibt sich eine Schaltfeldstärke von 13,2 kV/mm. Diese läge deutlich über den zur Charakterisierung genutzten und für die Anwendung relevanten Feldstärken und würde erklären, warum der Schalterpunkt nicht ermittelt werden kann. Zwar können auf diese Weise immer noch moderat nichtlineare Feldsteuermaterialien erzeugt werden, diese weisen aber eine deutlich geringere Wirksamkeit auf, wie in Abschnitt 4.4 gezeigt wurde. Durch eine gezielte Steigerung des Kornwachstums um etwa Faktor 5 bis 6 könnte es möglich sein, substratbasierte Feldsteuermaterialien zu erzeugen, die einen definierten Schalterpunkt im nutzbaren Bereich aufweisen. Hierzu könnten die Zusammensetzung der Dotierstoffe, die Parameter des Füllprozesses oder die Nachbehandlung angepasst werden. Erste Versuche in dieser Richtung zeigen, dass ein nachträgliches Sintern der Füllstoffe bei über 1000 °C zu einem Zusammenwachsen benachbarter Körner führt. Dabei muss beachtet werden, dass die spezifische Leitfähigkeit im Bereich der Betriebsfeldstärke nicht unzulässig erhöht wird. Dies ist möglicherweise in einem iterativen Prozess durch die Variation der Dotierstoffanteile erreichbar.

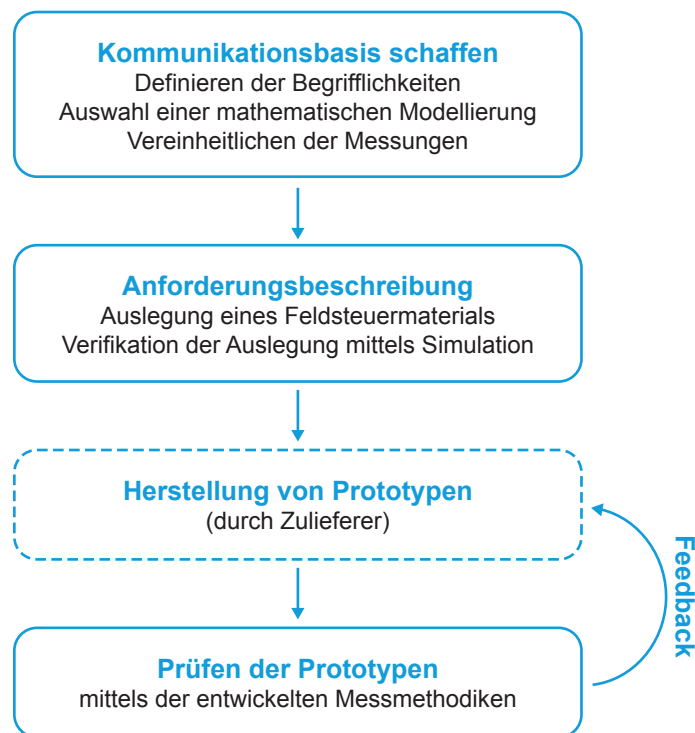
Im Fall der untersuchten Mikrovaristoren muss der entgegengesetzte Effekt erzielt werden. Die Korngröße liegt hier typischerweise im ein- bis zweistelligen Mikrometerbereich [Don2011], und die Schaltfeldstärken sind deutlich zu niedrig. Eine Reduktion der Korngröße lässt sich theoretisch durch die Zusammensetzung der Additive, die Sintertemperatur und -zeit erzielen [Don2012]. Es ist denkbar, dass hierdurch auch eine Reduktion der spezifischen Leitfähigkeit im ersten Bereich der Kennlinie erreicht werden kann. Obwohl diese Materialien nicht auf dem Markt erhältlich sind, gibt es Hinweise, dass sich Mikrovaristoren für hohe Feldstärken ertüchtigen lassen. Ein veröffentlichtes Ergebnis zeigt einen Mikrovaristorverbundstoff, der eine Schaltfeldstärke<sup>9</sup> von etwas über 3 kV/mm aufweist [Don2011]. Die spezifische Leitfähigkeit bei Betriebsfeldstärke ist mit  $\kappa_N < 10^{-12}$  S/m ebenfalls zulässig. Allerdings wurden an diesem Feldsteuermaterial allem Anschein nach keine Messungen mit Impulsspannungen durchgeführt, da im fraglichen Bereich keine Messpunkte angegeben sind. Daher kann keine Aussage über die spezifische Sättigungsleitfähigkeit getroffen werden, wodurch das Material nicht vollständig beurteilt werden kann. Nichtsdestoweniger ist es ein Hinweis darauf, dass auch die Weiterentwicklung von Mikrovaristoren für hohe Feldstärken möglich ist.

Unabhängig von den betrachteten Füllstofftypen erscheint für die Füllung von Volumina oder Volumenschichten die Entwicklung von sphärischen Partikeln sinnvoll, da diese die bisher beste Verarbeitbarkeit in Vergussprozessen aufweisen. Besonders wünschenswert wäre dabei eine schmale Partikelgrößenverteilung, da in diesem Fall die Perkolationsschwelle mit weniger Materialeinsatz überschritten wird. Weiterhin sollte eine geringe Dichte der Partikel, am besten ähnlich der Dichte des Epoxidharzes, angestrebt werden.

<sup>9</sup> Nach der in dieser Arbeit eingeführten Definition, siehe Abschnitt 2.3.2.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben aufgezeigt, dass ein erhebliches Potential besteht, die Feldverteilung in Isoliersystemen für Gleichspannungsanwendungen durch den Einsatz nichtlinearer Feldsteuermaterialien zu verbessern. Gleichzeitig gibt es bisher wenig Erfahrungen mit nichtlinearer Feldsteuerung in Betriebsmitteln für Spannungen über 320 kV. Hierzu müssen spezielle, maßgeschneiderte Feldsteuermaterialien für die jeweilige Anwendung zum Einsatz kommen, was einen systematischen Entwurfsprozess voraussetzt. Das Ziel dieser Arbeit war es, einen solchen Prozess durchzuarbeiten und dabei die Grundlage für eine Zusammenarbeit zwischen den Materialherstellern auf der einen Seite und den Isoliersystemdesignern auf der anderen Seite zu schaffen. Die hierzu durchgeführten Schritte sind in Abbildung 7.1 zusammengefasst.



**Abbildung 7.1.:** Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der vorliegenden Arbeit

An erster Stelle musste eine gemeinsame Basis für die Kommunikation erarbeitet werden. Hierzu wurde eine Modellgleichung gesucht, um das elektrische Verhalten nichtlinearer Feldsteuermaterialien zu beschreiben. Nach der Wahl einer passenden mathematischen Modellierung wurde diese noch angepasst, um zum einen ausreichend präzise zu sein, zum anderen aber einfach genug, um die Beschreibung auf wenige relevante Parameter reduzieren zu können. Damit wurde auch ein Teil der Antwort auf die erste Kernfrage dieser Arbeit „**Welche Größen müssen bekannt sein, um ein nichtlineares Feldsteuermaterial anwenden zu können?**“ gegeben. Die zur Beschreibung nötigen Parameter wurden zusammengestellt und definiert. Die wichtigsten sind die *Schaltfeldstärke*, die *spezifische Grundleitfä-*

*higkeit, die Steigung der Kennlinie* im nichtlinearen Bereich (Bereich 2) und die *Sättigungsfeldstärke*. Weiterhin kann für viele Feldsteuermaterialien eine bessere Beschreibung unter Zuhilfenahme der *Steigung der Kennlinie für geringe Feldstärken* (in Bereich 1) erzielt werden.

Der zweite Teil der Antwort auf die erste Kernfrage wurde durch die Auslegung eines Feldsteuermaterials und die anschließende Verifikation des Designs mit Hilfe der Feldsimulation gegeben. Am Beispiel eines Isoliersystems für eine gasisolierte 500-kV-Gleichspannungsleitung wurde ein nichtlineares Feldsteuermaterial nach dem aktuellen Stand der Technik ausgelegt. Anschließend wurde geprüft, wie der Einsatz dieses Wunschmaterials die Feldverteilung beeinflusst. Dies geschah sowohl für den stationären Betriebszustand als auch für den angenommenen Worst-Case. Dieser tritt ein, wenn das System ausreichend lange in Betrieb war und die Isolatoren damit *vorgeladen* sind, sich ein Temperaturgradient entlang des Isolators eingestellt hat und daraufhin eine Blitzstoßspannung mit entgegengesetzter Polarität überlagert wird.

Hierbei konnte gezeigt werden, dass sich mit Hilfe des Feldsteuermaterials erheblich geringere Maximalfeldstärken im Moment des Scheitels der Blitzstoßspannung ergeben, wodurch eine Verbesserung der Zuverlässigkeit des Isoliersystems zu erwarten ist. Durch Parametervariationen wurde aufgezeigt, welcher Spielraum in der Einstellung der elektrischen Eigenschaften besteht, ohne dass die Wirkung der Feldsteuerung eingeschränkt wird. Zusätzlich wurde ermittelt, innerhalb welchen Bereichs des Auslegungsspielraums zumindest noch eine verbessernde, wenn auch noch nicht optimale Wirkung durch ein Feldsteuermaterial erzielt werden kann.

Weiterhin konnte durch die Simulationen festgestellt werden, dass der spezifische Energieumsatz im Feldsteuermaterial nicht zu vernachlässigen ist. Gleichzeitig existieren bisher sehr wenige Untersuchungen zu dieser Thematik, was den Bedarf an Messungen noch unterstreicht. Analog zur Betrachtung der Veränderung der Feldverteilung durch stark nichtlineare Feldsteuermaterialien wurde der Einsatz moderat nichtlinearer Feldsteuermaterialien untersucht. Hier zeigte sich ein deutlich geringeres Verbesserungspotential im Bezug auf die Feldverteilung entlang des Isolators.

Ebenfalls konnte mithilfe der Simulationen gezeigt werden, dass stark nichtlineare Feldsteuermaterialien die Resilienz von Isoliersystemen gegenüber chaotischen Einflüssen erhöhen können. So neigen sie durch den Effekt der lokalen Feldsteuerung dazu, die Hintergrundfeldstärke in der Nähe von Partikeln oder Fremdschichten zu senken. Die positiven Effekte der Feldsteuerung bleiben auch erhalten, wenn das Feldsteuermaterial nur in Form einer Beschichtung aufgetragen wird. Es wurde gezeigt, dass hierzu allerdings die Formgebung beziehungsweise der Aufbau des Isolators an die Nutzung einer Beschichtung angepasst werden sollte, um das Material bestmöglich einzusetzen.

Neben der Tatsache, dass Einigkeit darüber bestehen muss, welche Informationen bekannt sein müssen, um ein Isoliersystem auszulegen, sollte auch ein Einverständnis darüber existieren, wie diese gewonnen werden. Die zweite Kernfrage, die durch diese Arbeit beantwortet werden sollte, lautete daher: **„Wie können die benötigten Materialparameter ermittelt werden?“**

Hierzu war es wichtig, nicht nur die Randbedingungen der durchzuführenden Messungen festzulegen, sondern Klarheit zu schaffen, welche Messungen überhaupt durchzuführen sind und die Argumente dafür verständlich zu machen. So zeigte sich, dass die derzeit von den Herstellern von Füllstoffen für nichtlineare Feldsteuermaterialien durchgeführten Messungen teilweise nicht zielführend sind: Die hier untersuchten Füllstoffe wiesen in unverarbeiteter Form meist eine signifikant geringere spezifische Leit-



---

fähigkeit auf als die aus ihnen hergestellten Verbundstoffe. Damit wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass die Messung an Pulvern keinen Ersatz für die Messung am zum Einsatz kommenden Verbundstoff darstellen kann. Diese Messungen können hingegen sehr nützlich sein, um neue Füllstoffprototypen relativ zu anderen einzuordnen und damit die Entwicklung schnell vorantreiben zu können.

Dies setzt voraus, dass die Messungen unter dokumentierten, reproduzierbaren und betrieblich relevanten Bedingungen durchgeführt werden. Wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden konnte, spielen methodische Aspekte eine große Rolle. So wurde deutlich, dass die Konditionierung der Prüflinge einen Einfluss auf das Ergebnis nehmen kann. Im Idealfall sollte die Konditionierung nicht nach einem starren Muster durchgeführt werden, sondern durch die Messung des Stroms während des Prozesses überwacht werden, ob der Prüfling ausreichend konditioniert wurde. Diese Erkenntnis lässt sich sinngemäß auch auf die eigentliche Messung der Gleichstromleitfähigkeit von festen und pulverförmigen Prüflingen übertragen, bei der die Messdauer einen Einfluss auf das Ergebnis ausüben kann. Wenn das Ziel der Messungen das Erstellen einer resistiven Kennlinie ist, sollte nicht unabhängig vom Prüfling an einer Prozedur festgehalten werden. Vielmehr konnte gezeigt werden, dass sich als erste Messung an einem neuen Material eine Langzeitmessung über mehrere Stunden eignet. Anhand des Stromverlaufs während dieser Zeit lässt sich abschätzen, welches Messintervall eingehalten werden sollte, um einen stationären Leitungsstrom aufzunehmen. Unter Umständen ist dies mit vertretbarem Aufwand gar nicht möglich, da sich bei schwach leitfähigen Verbundstoffen ein stationärer Zustand teilweise erst nach einigen Tagen einstellte. Für diesen Fall wurde mittels der Annäherung nach der General-Response-Funktion ein Ansatz zur Abschätzung der stationären spezifischen Leitfähigkeit gegeben.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Luftfeuchte als Umgebungsbedingung einen Einfluss auf die spezifische Leitfähigkeit von Feldsteuermaterialien ausübt. Da in gasisolierten Systemen, die den Fokus der durchgeführten Untersuchungen bilden, ein trockenes Isoliergas eingesetzt wird, sollten die Messungen entsprechend unter dieser Bedingung durchgeführt werden. Neben der Luftfeuchte existiert auch ein (erwarteter) Einfluss durch die Prüftemperatur und, im Fall von Pulverprüflingen, auch vom Anpressdruck der Elektroden sowie von der Kompaktierung des Pulvers. Diese Erkenntnisse stützen die Forderung, diese Prüfparamater zusammen mit den Ergebnissen anzugeben.

Um die Charakterisierungsmessungen zu komplettieren, wurde ein Versuchsstand entwickelt, der die Untersuchung nichtlinearer Feldsteuermaterialien mit Spannungs- und Stromimpulsen ermöglicht. Nur auf diese Weise ließ sich die Kennlinie vollständig ermitteln. Dies schließt auch die Sättigungsleitfähigkeit, respektive -feldstärke mit ein, die für den effektiven Einsatz eines nichtlinearen Feldsteuermaterials eine wichtige Rolle spielen, wie durch die Simulationen gezeigt werden konnte.

Mittels dieses Versuchstandes wurden auch die Belastbarkeit und das Ausfallverhalten eines Mikrovaristorverbundstoffes bei impulsförmiger Beanspruchung untersucht. Es zeigte sich, dass der Ausfall der Prüflinge häufig nicht im Scheitel des Spannungs- oder Stromverlaufs auftrat. Stattdessen kam es nach Erreichen eines gut reproduzierbaren Energieumsatzes in den Prüflingen zu deren Zerstörung. Dies stützt die Annahme, dass das Energieaufnahmevermögen, ähnlich wie bei Varistoren der Ableitertechnik, eine kritische Größe für stark nichtlineare Feldsteuermaterialien darstellt. Diese sollte bei potentiellen Materialien ermittelt werden und ebenso in die Produktinformation eines Herstellers eingehen.

Die im Rahmen der Arbeit entwickelten oder weiterentwickelten Methoden wurden angewendet, um die derzeit am Markt erhältlichen oder als Prototyp verfügbaren Füllstoffe zu prüfen. Die Anforderungen

ergaben sich aus der Beispielanwendung eines Isoliersystems für eine gasisolierte Gleichspannungsleitung für 500 kV. Es konnten dabei drei Verbundstoffe identifiziert werden, die sich für den Einsatz als moderat nichtlineare Feldsteuermaterialien eignen würden. Mittels des Einsatzes moderat nichtlinearer Feldsteuermaterialien können die maximal entlang des Isolators auftretenden Feldstärken jedoch nur in einem geringen Maße gesenkt werden. Die beiden untersuchten stark nichtlinearen Feldsteuermaterialien gehörten beide zur Klasse der Mikrovaristoren und haben sich für den Einsatz als ungeeignet erwiesen. Beide zeigten deutlich zu geringe Schaltfeldstärken und eine zu hohe spezifische Leitfähigkeit im Dauerbetrieb.

Die wesentlichen Erkenntnisse im Bezug auf die Ermittlung und Beschreibung der Materialparameter nichtlinearer Feldsteuermaterialien haben neben der Aufzählung in dieser Arbeit auch Eingang in die Cigré-Broschüre *Field Grading in Electrical Insulation Systems* der Arbeitsgruppe D1.56 gefunden.


In zukünftigen Arbeiten sollten sowohl die substratbasierten Füllstoffe als auch Füllstoffe aus der Klasse der Mikrovaristoren weiter untersucht werden. Die entwickelten Methoden erlauben eine schnelle und zuverlässige Einordnung neuer Materialien, wodurch deren Entwicklung effizienter erfolgen kann. An den substratbasierten Füllstoffen konnten Fortschritte in Bezug auf die Verarbeitbarkeit erzielt werden. Zudem wurde mit der derzeit zu geringen Korngröße der Beschichtung ein Materialparameter identifiziert, dessen Modifikation vielversprechend erscheint.

Laut Angaben aus der Literatur lassen sich Mikrovaristoren auch mit höheren Schaltfeldstärken herstellen. In Anbetracht des großen Potentials der nichtlinearen Feldsteuerung sollte versucht werden, diese Ergebnisse zu reproduzieren. Auch hier sollte die Korngröße eine Möglichkeit darstellen, die Schaltfeldstärke zu variieren. Weiterhin sollte das Zusammenspiel zwischen Füllstoff und Isolierstoffmatrix weiter untersucht werden, um unerwünschte Effekte ausschließen zu können, wie etwa eine unzulässige Erhöhung der spezifischen Grundleitfähigkeit. Eine bessere Vorhersage der Verbundstoffeigenschaften aus den Eigenschaften der Füllstoffe wäre zudem eine gute Möglichkeit, den Prozess der Materialentwicklung zu beschleunigen.

Wenn neue Füllstoffe und die daraus hergestellten Verbundstoffe ihre theoretische Eignung in den charakterisierenden Messungen unter Beweis gestellt haben, muss geprüft werden, wie alterungsbeständig die Materialien sind. Hierzu muss in Dauerversuchen nachgewiesen werden, dass keine unzulässigen Veränderungen der Materialparameter eintreten (vgl. [Ten2015]).

Zuletzt kann zum jetzigen Zeitpunkt keine Simulation die Prüfung am realen Betriebsmittel ersetzen. Wird ein potentiell Feldsteuermaterial gefunden, muss es in ein Isoliersystem integriert und dieses geprüft werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Prüfung aus technischer Sicht sinnvoll gewählt wird. Für das hier diskutierte Isoliersystem muss demnach der Worst-Case nachgebildet werden. Gleichzeitig sind manche Prüfungen aus technischer Sicht nicht sinnvoll, wenn nichtlineare Feldsteuermaterialien eingesetzt werden. So sollte in diesem Fall keine dauerhafte Prüfung mit doppelter Betriebsspannung durchgeführt werden. Auch können stark nichtlineare Materialien einen Einfluss auf die Prüfbarkeit der Betriebsmittel ausüben, wie im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt wurde.

Gelingt es den Herstellern der Füllstoffe, Feldsteuermaterialien mit höheren Schalteigenschaften herzustellen, kann dies die Entwicklung zuverlässigerer und dabei kompakterer gasisolierter Gleichspannungssysteme ermöglichen. Hierdurch kann Rohmaterial, beispielsweise Isoliergas und Aluminium für die Kapselung, gespart werden. Auch wenn durch diese Entwicklungen keine Feldsteuermaterialien für exakt das



---

im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Modell-Isoliersystem entstehen, wäre eine generelle Erweiterung der Palette an Verbundstoffen mit definierter spezifischer Leitfähigkeit wünschenswert. Hierdurch würde die Basis für das Design zukünftiger Gleichspannungsisoliersysteme deutlich verbreitert werden.



---

# A Anhang

---

## A.1 Versuchsstand zur Charakterisierung mit Gleichspannung

---

Die Ermittlung der Gleichstromleitfähigkeit von Feldsteuermaterialien setzt sowohl eine große Bandbreite in Bezug auf die zur Verfügung zu stellende Spannung als auch auf die zu messenden Ströme voraus. So wurden im Laufe der hier vorliegenden Arbeit spezifische Leitfähigkeiten zwischen  $10^{-15}$  S/m und  $10^{-4}$  S/m festgestellt. Entsprechend muss der Versuchsstand eine ausreichende Flexibilität aufweisen. Gleichzeitig erfordert die Ermittlung von geringen spezifischen Leitfähigkeiten eine genaue Kontrolle der Umgebungsbedingungen.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, wird bei der Implementierung des Versuchsstandes ein modulares Konzept verfolgt. Ein Hauptmodul stellt die Prüfkammer dar, das andere die Spannungsversorgung und Strommessung. Im Rahmen dieser Arbeit kommt als Prüfkammer ein Klimaschrank vom Typ *Weiss WK3-180/40* zum Einsatz, mittels dessen die Temperatur im Bereich von  $-42...+180$  °C geregelt werden kann. Weiterhin kann die relative Luftfeuchte (in Abhängigkeit der Temperatur) zwischen 10 % und 98 % eingestellt werden. Für niedrigere gewünschte Luftfeuchten wird die Feuchterege- lung deaktiviert und Trockenmittel in den Klimaschrank gegeben. Der Klimaschrank ist mit einer am Fachgebiet Hochspannungstechnik hergestellten Durchführung für bis zu 30 kV (DC) ausgestattet, um den Anschluss an die Prüfspannung zu ermöglichen.

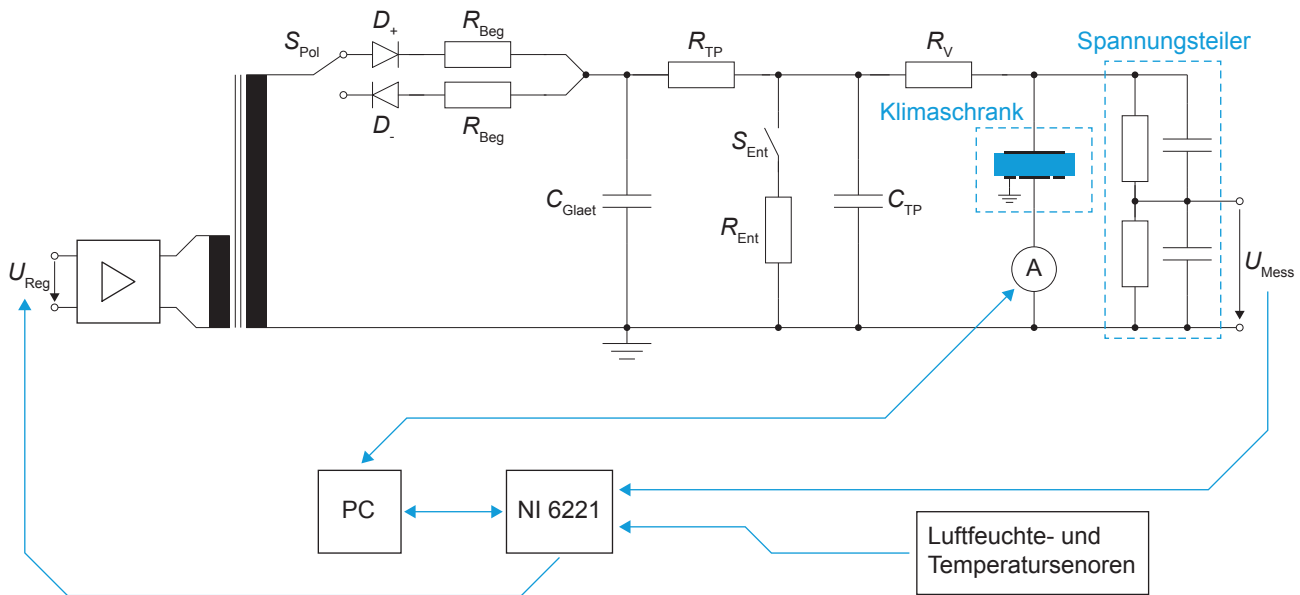
Zur Messung der Temperatur und von relativen Luftfeuchten über 10 % wird ein kombinierter Sensor vom Typ *Sensirion SHT 75* eingesetzt. Zur Messung geringerer Luftfeuchte kommt ein Taupunktsensor vom Typ *Michell SF52* zum Einsatz. Dieser erlaubt die Bestimmung des Taupunkts bis zu  $-40$  °C, was bei einer Gastemperatur von  $30$  °C einer relativen Luftfeuchte von unter 0,5 % entspricht.

Als alternative Prüfkammer-Module stehen ein Trockenschrank und eine Vakuumkammer zur Verfügung. Die Vakuumkammer erlaubt neben der namensgebenden Funktion auch die Prüfung in Isoliergas bis zu Umgebungsdruck.

Das zweite Hauptmodul, das Spannungsbereitstellung und Strommessung beinhaltet, wird für die vorliegende Arbeit in zwei Varianten ausgeführt. Ursache hierfür sind die divergierenden Anforderungen an die Spannungsversorgung, welche sich durch den Umfang der möglichen spezifischen Leitfähigkeiten ergeben.

Zur Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit von Materialien, die sich an der Grenze zum Isolierstoff bewegen, ist die Messung von Strömen im einstelligen Picoampere-Bereich nötig. Hierzu muss die Spannung hohe Anforderungen erfüllen: Eine Spannungsänderung  $\frac{du}{dt}$  ruft durch die Kapazität des Prüflings einen kapazitiven Strom hervor, der bei hochohmigen Prüflingen in der Größenordnung des zu messenden Gleichstroms oder darüber liegen kann. Daher sollte die Restwelligkeit der Spannungsquelle möglichst gering ausfallen und die Quelle eine hohe Langzeitstabilität aufweisen.

Diese Anforderungen stehen im Kontrast zu einer möglichst dynamischen Spannungsquelle, um mehrere Kennlinienpunkte in rascher Abfolge anfahren zu können, falls es sich beim in der Untersuchung befindlichen Material um ein relativ leitfähiges Feldsteuermaterial handelt.

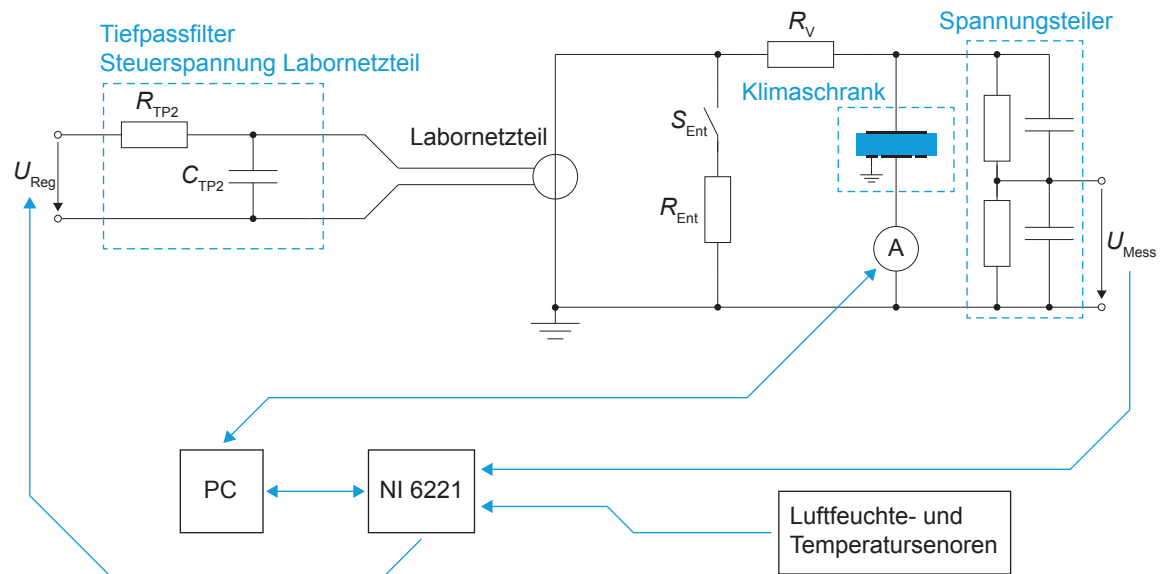


**Abbildung A.1.:** Schaltbild des Versuchsstandes zur Charakterisierung mit Gleichspannung, Variante 1 mit Einweggleichrichterschaltung

Für Messungen über lange Zeitbereiche wird daher Variante 1 des Versuchsstandes eingesetzt (vgl. Schaltbild gemäß Abbildung A.1). Es handelt sich dabei um eine einfache Einweggleichrichterschaltung (mittels Wechselschalter in beiden Polaritäten einsetzbar) mit vergleichsweise hoher Glättungskapazität  $C_{Glaet} = 564 \text{ nF}$ . Nachgelagert ist ein Tiefpassfilter zur weiteren Reduktion der Restwelligkeit. Das Anfahren eines Spannungswertes in dieser Konfiguration benötigt etwa 90 s. Die Spannungsregelung wird durch ein auch zur Messwerteaufzeichnung eingesetztes *LabVIEW*-Programm durchgeführt. Mittels dieses Aufbaus lassen sich Gleichspannungen von bis zu  $\pm 35 \text{ kV}$  bereitstellen.

Für Kurzzeitmessungen kommt Variante 2 des Versuchsstandes zum Einsatz (vgl. Schaltbild gemäß Abbildung A.2). Die eigene Spannungsversorgung wird hier durch ein Labornetzteil vom Typ *Heinzinger PNChp 20000-3 ump* ersetzt. Dieses stellt bis zu  $\pm 20 \text{ kV}$  (DC) bereit und weist dabei einen Restwelligkeitsfaktor von  $\leq 0,001 \%$  auf, bei einer Abweichung der Spannung von  $\leq 0,001 \%$  über acht Stunden. Die Ansteuerung des Labornetzteils erfolgt über eine analoge Schnittstelle, woraus sich die folgenden Besonderheiten ergeben: Rampen oder ähnliche langsame Spannungsverläufe lassen sich frei programmieren. Dies wurde genutzt, um den Übergang zwischen zwei Spannungsstufen stets in Form einer linearen Spannungssteigerung über 10 s stattfinden zu lassen. Nachteilig ist allerdings, dass Rauschen und Einkopplungen in der Steuerspannung die Spannung am Ausgang des Netzteils beeinflussen. Daher ist vor den analogen Eingang ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 14,5 Hz geschaltet.

Um die in den Versuchskreisläufen vorhandenen Kapazitäten ausreichend schnell zu entladen, ist ein automatisierter Erdschalter vorgesehen. Dieser wird bei einem Öffnen des Sicherheitskreises geschlossen und ist *fail-safe* ausgeführt, löst also auch bei einem Ausfall der Steuerspannung oder der Druckluft aus. Die Dimensionierung der in den Schaltplänen aufgeführten Bauteile kann Tabelle A.1 entnommen werden.



**Abbildung A.2.:** Schaltbild des Versuchsstandes zur Charakterisierung mit Gleichspannung, Variante 2 mit Labornetzteil

**Tabelle A.1.:** Bauteile DC-Charakterisierungsversuchsstand

Bauteil	Wert
$C_{Glaet}$	564 nF
$C_{TP}$	47 nF
$R_{TP}$	250 k $\Omega$
$R_V$	250 k $\Omega$
$R_{Ent}$	25 k $\Omega$
$R_{Beg}$	12 k $\Omega$
$C_{TP2}$	3,33 $\mu$ F
$R_{TP2}$	3,29 k $\Omega$

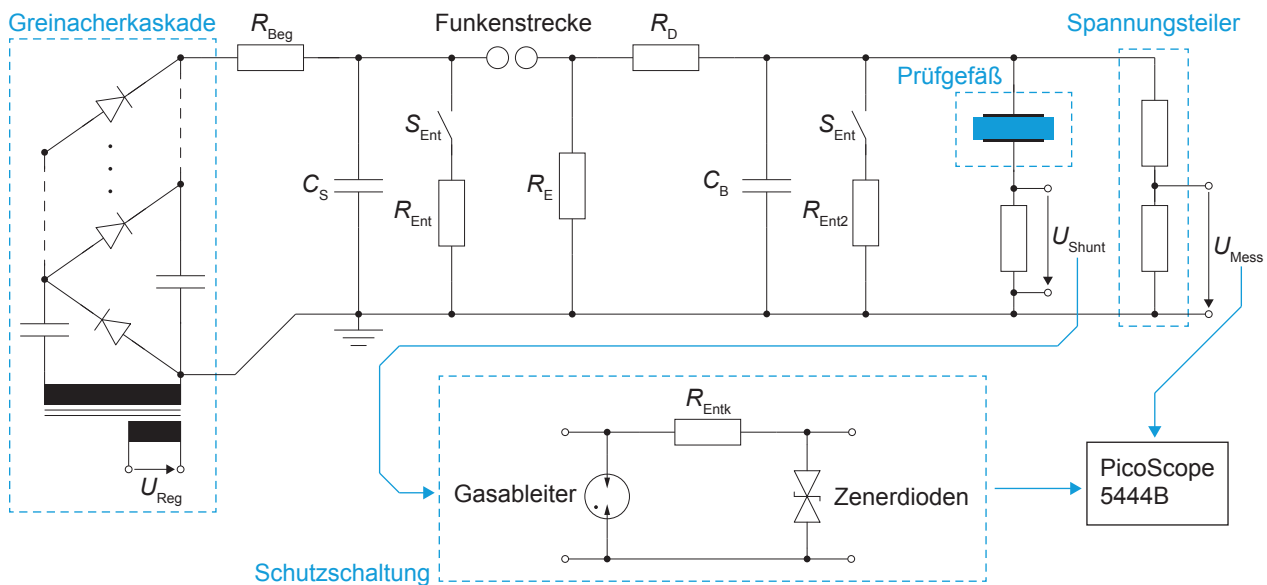
In beiden Schaltungsvarianten kommt ein ohmsch-kapazitiver Hochspannungsteiler mit einem Teiler- verhältnis von 5078,4:1 zum Einsatz. Die Erfassung der Spannung erfolgt mittels einer Datenerfassungs- karte vom Typ NI PCI-6221. Als Strommessgerät wird das Picoamperemeter *Keithley Modell 6485* genutzt, welches eine minimale Auflösung von 10 fA und eine Messunsicherheit von maximal 0,4 % (in Abhän- gigkeit des Messbereichs) aufweist. Die Erfassung, Verarbeitung und das Speichern der Messdaten wird durch ein *LabVIEW*-Programm realisiert. Dieses regelt ebenfalls die Spannung und überwacht sowohl Strom und Spannung auf das Überschreiten von vordefinierten Grenzwerten.

Zusätzlich zu den in der Prüfkammer installierten Sensoren werden auch die Umgebungsbedingun- gen durch einen weiteren Luftfeuchte- und Temperatursensor vom Typ *Sensirion SHT 75* gemessen. Die Daten der Sensoren werden ebenfalls dauerhaft durch das *LabVIEW*-Programm aufgezeichnet, um bei- spielsweise den Einfluss schneller Temperaturschwankungen auf die Messmittel prüfen zu können.



## A.2 Versuchsstand zur Charakterisierung mit Spannungs- und Stromimpulsen

Für die Untersuchung von Feldsteuermaterialien oberhalb der Schaltfeldstärke wird ein Impulsgenerator zur Erzeugung doppel-exponentieller Stoßspannungen nach *Grundschialtung 1* (vgl. [Küc2017]) eingesetzt. Es wird ein modulares Aufbauprinzip verfolgt, was die Erzeugung verschiedener Spannungsformen ermöglicht. Der Aufbau des Versuchsstandes ist in Abbildung A.3 dargestellt. Mit Hilfe des Impulsgenerators soll sowohl eine Blitzstoßspannung der Form 1,2/50  $\mu\text{s}$  als auch eine Schaltstoßspannung der Form 250/2500  $\mu\text{s}$  erzeugt werden können, da diese Spannungsformen anwendungsnahe dielektrische Belastungen darstellen.



**Abbildung A.3.:** Schaltbild des Versuchsstandes für die Messungen mit Impulsspannung, alternativ zum Shunt kann ein Stromwandler eingesetzt werden, alternativ zum ohmschen Teiler kann ein Hochspannungstastkopf eingesetzt werden

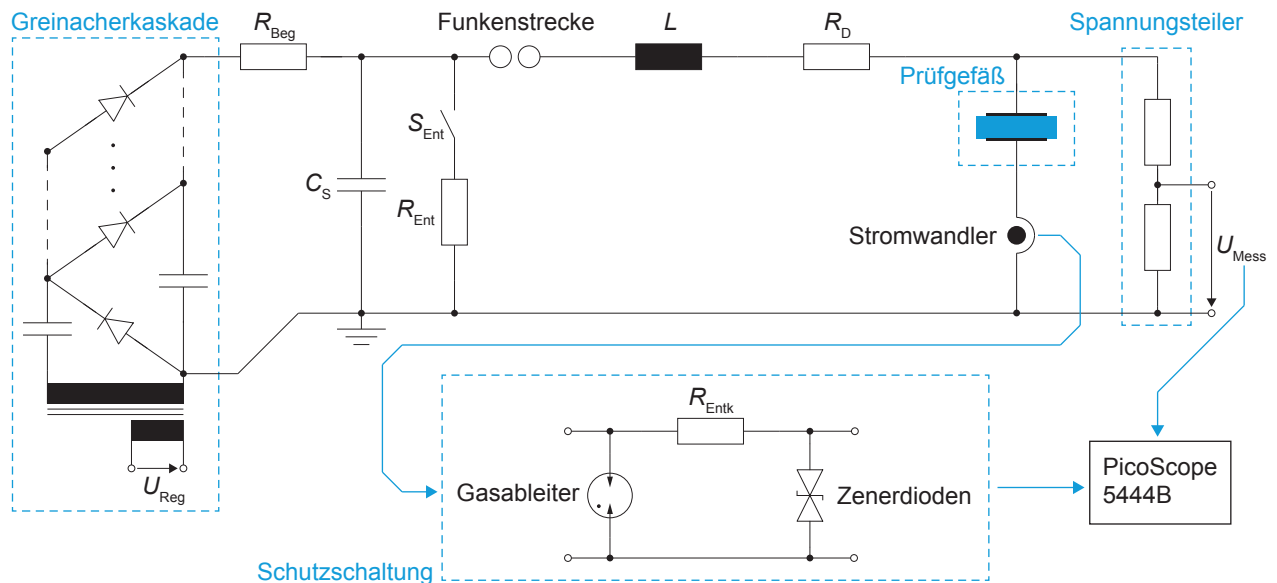
Wie sich im Laufe der Untersuchungen herausstellte, ist es sinnvoll, das Repertoire um eine weitere, langsamere Impulsform zu erweitern. Diese weist eine Scheitelzeit von 20 ms und eine Rückenhalbwertszeit von 450 ms auf und kann zur Erfassung von weiteren Kennlinienpunkten eingesetzt werden. Im Folgenden wird diese Impulsform als *langer Impuls* bezeichnet.

Die Bauteile des Generators werden unter Berücksichtigung der Prüflingsabmessungen (vgl. Kapitel 5) und der in Abschnitt 4.3 entwickelten Zielkennlinie dimensioniert. Dabei ist das Ziel, einen vertretbaren Spannungsausnutzungsgrad von  $>90\%$  zu erreichen, auch wenn ein Prüfling eine gegenüber der Zielkennlinie um Faktor zehn erhöhte spezifische Sättigungsleitfähigkeit aufweist. Die gewählten Werte der Kondensatoren und Widerstände sind in Tabelle A.2 zusammengefasst. Aus dem zu untersuchenden Bereich der Feldstärke ( $\approx 7 \text{ kV/mm}$ , vgl. Abschnitt 4.3) und der Höhe der Prüflinge (2...3 mm) ergibt sich eine Forderung der Prüfspannung von etwa 21 kV. Unter Einbezug einer Sicherheitsmarge für den Spannungsausnutzungsgrad wird der Generator für eine Ladespannung von 30 kV ausgelegt. Hierdurch kann ein einstufiges Design gewählt werden, was die Triggerung des Kreises vereinfacht.

**Tabelle A.2.: Beschaltungsoptionen Impulsgenerator**

Bauteil	Beschaltung für		
	Schaltstoßspannung	Blitzstoßspannung	langer Impuls
$C_S$		500 nF	
$C_B$		4,7 nF	20,7 nF
$R_E$	6,5 k $\Omega$	132 $\Omega$	1,2 M $\Omega$
$R_D$	15,2 k $\Omega$	102 $\Omega$	220 k $\Omega$

Da die hier untersuchten Prüflinge eine hohe Leitfähigkeit aufweisen (vgl. Abschnitt 6.2.1), wurde beschlossen, zusätzlich die Beschaltung des Generators als  $RLC$ -Schwingkreis zu realisieren, um einen höheren Spannungsausnutzungsgrad zu erreichen. Das entsprechende Schaltbild ist in Abbildung A.4 gezeigt. Dabei wird die Stoßkapazität  $C_S = 500$  nF beibehalten und der Dämpfungswiderstand  $R_D$  auf 30  $\Omega$  reduziert. Zusätzlich wird eine Induktivität von  $L = 570$   $\mu$ H eingebaut. Diese weist einen ohmschen Widerstand von 1,6  $\Omega$  auf.



**Abbildung A.4.:** Schaltbild des Versuchsaufbaus für die Messungen mit Impulsstrom, alternativ zum Stromwandler kann ein Shunt eingesetzt werden, alternativ zum ohmschen Teiler kann ein Hochspannungstastkopf eingesetzt werden

## Messmittel

Die Spannungsmessung wird mittels zweier unterschiedlicher Spannungsteiler realisiert. Zur Messung der Schaltstoßspannung und des langsamen Spannungsimpulses wird auf einen Hochspannungstastkopf vom Typ *Testec HVP-15HF* zurückgegriffen. Um die schnelleren Anstiegszeiten des Blitzstoßspannungsverlaufs und des  $RLC$ -Schwingkreises erfassen zu können, wird ein niederimpedanter ohmscher Spannungsteiler aufgebaut. Der Hochspannungswiderstand beträgt 12,6 k $\Omega$ . Die Bandbreite des Teilers wird mit 54 MHz abgeschätzt. Die Messunsicherheiten der beiden Messsysteme (jeweils in Verbindung mit dem Oszilloskop) betragen 3,02 % für den ohmschen Teiler und 3,47 % für den Tastkopf.

Zur Messung von Strömen mit Amplituden bis zu 3,2 A kommen unterschiedliche Shunt-Widerstände (Typ *TE Connectivity 3522*, 100  $\Omega$ ; 50  $\Omega$ ; 10  $\Omega$  und 5  $\Omega$ ;) zum Einsatz. Für Ströme größerer Amplitude wird ein Wandler vom Typ *Pearson Current Monitor Model 410* genutzt.

Zur Aufzeichnung der Messsignale kommt ein Oszilloskop vom Typ *PicoScope 5444B* zum Einsatz. Dieses unterstützt eine vertikale Auflösung von 14 Bit bei einer Abtastrate von 125 MS/s.

Um das Oszilloskop vor Überspannungen zu schützen, wie sie bei einer deutlichen Unterschätzung der Leitfähigkeit des Prüflings oder bei einem Durchschlag des Prüflings, auftreten können, wurde eine Schutzschaltung vor dem Eingang des Oszilloskopes vorgesehen. Der Aufbau ist in den Abbildungen A.3 und A.4 wiedergegeben. Die Kapazität der Zenerdioden beträgt 55 pF. Zusammen mit dem 1-k $\Omega$ -Entkopplungswiderstand ergibt sich eine Grenzfrequenz der Schutzschaltung von 5,8 MHz. Die Amplitudendichteverteilung einer genormten Blitzstoßspannung ist nur bis 200 kHz von Relevanz (darüber liegt weniger als 1 % der Verteilung). Damit ist die Grenzfrequenz ausreichend hoch, auch wenn durch die Nichtlinearität des Prüflings weitere höhere Frequenzanteile generiert werden.

### Prüfgefäß

In Vormessungen an Prüflingen aus herkömmlichem Isolierstoff konnte festgestellt werden, dass bei Umgebungsdruck mit  $U_{d0} = 15,0$  kV bei Blitzstoßspannung und  $U_{d0} = 14,8$  kV bei Schaltstoßspannung für einen Überschlag entlang der Prüflingsoberfläche zu rechnen ist. Um Überschlage entlang der Prüflinge zu vermeiden, wird ein Prüfgefäß eingesetzt, in dem sich ein Überdruck von bis zu 3 bar einstellen lässt. Dieses ist in Abbildung A.5 dargestellt.



**Abbildung A.5.:** Prüfgefäß zur Unterdrückung von Außenüberschlägen an Prüflingen, max. Überdruck: 3 bar [Kem2017\*]

Bereits bei einer Steigerung des Drucks um 1 bar wird eine Prüfspannung von 25 kV ohne Ausnahme gehalten. Damit entfällt die Notwendigkeit, auf ein Isoliergas mit Treibhauspotential wie SF<sub>6</sub> zurückzugreifen oder eine Isolierflüssigkeit zu nutzen, welche die Handhabung der Prüflinge verlangsamen würde.

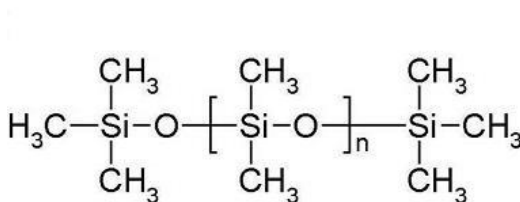


### WACKER® AK 5

SILICONÖL

#### Produktbeschreibung

Strukturformel:



WACKER® AK 5 ist ein lineares, nichtreaktives Polydimethylsiloxan mit einer Viskosität von circa 5 mm<sup>2</sup>/s. Aufgrund seiner chemischen Struktur verfügt WACKER® AK 5 über ein besonderes Eigenschaftsspektrum und hebt sich dadurch von organischen Materialien, wie beispielsweise Mineralölen, ab.

#### Eigenschaften

WACKER® AK 5 ist eine geruch- und farblose, klare Flüssigkeit.

#### Besondere Merkmale

- geringe Änderung der physikalischen Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich
- ausgezeichnete wasserabstossende Eigenschaften
- gute dielektrische Eigenschaften
- geringe Oberflächenspannung und damit hohe Oberflächenaktivität
- hohe chemische Inertheit
- geringer Stockpunkt
- hohe Temperaturbeständigkeit
- gute Löslichkeit in einer Vielzahl von Lösungsmitteln

#### Anwendung

- Trennmittel

- Schmiermittel
- Hydrauliköl
- Antischaummittel
- flüssiges Dielektrikum für elektrische und elektronische Ausrüstung
- Pflegemittelzusatz
- Textil- und Faserhilfsmittelzusatz
- chemisches Hilfsmittel
- Beschichtung von Ampullen, Linsen und Spiegel
- Kriechöl
- oberflächenaktiver Wirkstoff

Für den kosmetischen Bereich sind Siliconöle aus dem Produktprogramm BELSIL® erhältlich. Für besonders hohe Anforderungen an Hitze- und Scherstabilität empfehlen wir Siliconöle aus den Produktreihen AK STAB, AK VISC und AKC.

#### Verarbeitung

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen kann kein genereller Verarbeitungshinweis für WACKER® AK 5 gegeben werden. Die Handhabung ist auf den Einzelfall abzustimmen.

WACKER® SILICONÖLE AK unterschiedlicher Viskosität sind miteinander beliebig mischbar, so dass jede gewünschte Viskosität eingestellt werden kann, falls diese nicht als Standardprodukt erhältlich ist.

Als unpolare Flüssigkeit ist WACKER® AK 5 oft nicht mischbar mit stark polaren Lösungsmitteln, wie zum Beispiel Wasser. In aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen, Chlorkohlenwasserstoffen, Ethern, Estern, Ketonen und höheren Alkoholen ist WACKER® AK 5 in jedem Verhältnis löslich. In wasserfreien niedrigeren Alkoholen, insbesondere Butanol, Isopropanol und Dioxan, ist die Löslichkeit meist sehr gut. Vor dem erstmaligen Einsatz mit Lösungsmitteln empfiehlt sich jeweils eine Prüfung im Labormaßstab. Beim Umgang mit Lösungsmitteln sind die entsprechenden Gefahrenhinweise zu beachten.

## Lagerung

Maximale Temperatur bei Lagerung und Transport:  
40 °C

Das Mindesthaltbarkeitsdatum der jeweiligen Charge ist auf dem Produktetikett angegeben.

Eine Lagerung über den auf dem Produktetikett angegebenen Zeitraum hinaus bedeutet nicht notwendigerweise, dass die Ware unbrauchbar ist. Eine Überprüfung der für den jeweiligen Einsatzzweck

erforderlichen Eigenschaftswerte ist jedoch in diesem Falle aus Gründen der Qualitätssicherung unerlässlich.

## Sicherheitstechnische Hinweise

Ausführliche Hinweise enthalten die jeweiligen Sicherheitsdatenblätter. Diese können bei unseren Vertriebsgesellschaften angefordert oder über die WACKER-Internet-Seite (<http://www.wacker.com>) ausgedruckt werden.

## Produktdaten

Typische Allgemeine Eigenschaften	Prüfmethode	Wert
Aussehen		farblos, klar
Viskosität, kinematisch bei 25 °C	DIN 53019	ca. 5 mm²/s
Dichte bei 25 °C	DIN 51757	ca. 0,92 g/cm³
Brechungsindex bei 20 °C		1,396
Flammpunkt	EN 22719	130 °C
Oberflächenspannung bei 25 °C		0,019 N/m
Zündtemperatur (Flüssigkeiten)	EN 14522	350 °C
Viskosität, dynamisch bei 25 °C	DIN 53019	5 mPa.s

Diese Angaben stellen Richtwerte dar und sind nicht zur Erstellung von Spezifikationen bestimmt.

Die in diesem Medium mitgeteilten Daten entsprechen dem derzeitigen Stand. Der Abnehmer ist von sorgfältigen Eingangsprüfungen im Einzelfall hierdurch nicht entbunden. Änderungen der Produktkennzahlen im Rahmen des technischen Fortschritts oder durch betrieblich bedingte Weiterentwicklungen behalten wir uns vor. Die in diesem Medium gegebenen Hinweise und Informationen erfordern wegen durch uns nicht beeinflussbarer Faktoren während der Verarbeitung, insbesondere bei der Verwendung von Rohstoffen Dritter, eigene Prüfungen und Versuche. Unsere Hinweise und Informationen entbinden nicht von der Verpflichtung, eine eventuelle Verletzung von Schutzrechten Dritter selbst zu überprüfen und gegebenenfalls zu beseitigen. Verwendungsvorschläge begründen keine Zusicherung der Eignung für einen bestimmten Einsatzzweck. Die Inhalte dieses Mediums sprechen Frauen und Männer gleichermaßen an. Zur besseren Lesbarkeit wird nur die männliche Sprachform (z. B. Kunde, Mitarbeiter) verwendet.

Managementsystem  
zertifiziert nach  
DIN EN ISO 9001 und  
DIN EN ISO 14001  
  
WACKER® ist eine  
eingetragene Marke der  
Wacker Chemie AG.

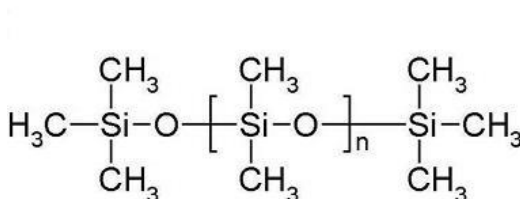
Alle technischen, die  
Qualität und  
Produktsicherheit  
betreffenden Fragen richten  
Sie bitte an:  
  
Wacker Chemie AG  
Hanns-Seidel-Platz 4  
81737 München, Germany  
[info.silicones@wacker.com](mailto:info.silicones@wacker.com)  
  
[www.wacker.com](http://www.wacker.com)

## WACKER® AK 10

### SILICONÖL

#### Produktbeschreibung

Strukturformel:



WACKER® AK 10 ist ein lineares, nichtreaktives Polydimethylsiloxan mit einer Viskosität von circa 10 mm<sup>2</sup>/s. Aufgrund seiner chemischen Struktur verfügt WACKER® AK 10 über ein besonderes Eigenschaftsspektrum und hebt sich dadurch von organischen Materialien, wie beispielsweise Mineralölen, ab.

#### Eigenschaften

WACKER® AK 10 ist eine geruch- und farblose, klare Flüssigkeit.

#### Besondere Merkmale

- geringe Änderung der physikalischen Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich
- ausgezeichnete wasserabstossende Eigenschaften
- gute dielektrische Eigenschaften
- geringe Oberflächenspannung und damit hohe Oberflächenaktivität
- hohe chemische Inertheit
- geringer Stockpunkt
- hohe Temperaturbeständigkeit
- gute Löslichkeit in einer Vielzahl von Lösungsmitteln

#### Anwendung

- Trennmittel
- Schmiermittel

- Hydrauliköl
- Antischaummittel
- flüssiges Dielektrikum für elektrische und elektronische Ausrüstung
- Wärmeträgeröl
- Pflegemittelzusatz
- Textil- und Faserhilfsmittelzusatz

Für den kosmetischen Bereich sind Siliconöle aus dem Produktprogramm BELSIL® erhältlich. Für besonders hohe Anforderungen an Hitze- und Scherstabilität empfehlen wir Siliconöle aus den Produktreihen AK STAB, AK VISC und AKC. Für den Einsatz als Siliconweichmacher in RTV-1-Dichtungsmassen sind gesonderte Qualitäten notwendig und stehen als WACKER® WEICHMACHER zur Verfügung.

#### Verarbeitung

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen kann kein genereller Verarbeitungshinweis für WACKER® AK 10 gegeben werden. Die Handhabung ist auf den Einzelfall abzustimmen.

WACKER® SILICONÖLE AK unterschiedlicher Viskosität sind miteinander beliebig mischbar, so dass jede gewünschte Viskosität eingestellt werden kann, falls diese nicht als Standardprodukt erhältlich ist.

Als unpolare Flüssigkeit ist WACKER® AK 10 nicht mischbar mit stark polaren Lösungsmitteln, wie zum Beispiel Wasser. In aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen, Chlorkohlenwasserstoffen, Ethern, Estern, Ketonen und höheren Alkoholen ist WACKER® AK 10 in jedem Verhältnis löslich. In manchen kurzkettigen Alkoholen wie Butanol, Isopropanol und Dioxan, ist die Löslichkeit gut. Vor dem erstmaligen Einsatz mit Lösungsmitteln empfiehlt sich jeweils eine Prüfung im Labormaßstab. Beim Umgang mit Lösungsmitteln sind die entsprechenden Gefahrenhinweise zu beachten.

#### Lagerung

Maximale Temperatur bei Lagerung und Transport:  
50 °C  
Das Mindesthaltbarkeitsdatum der jeweiligen Charge



ist auf dem Produktetikett angegeben.

Eine Lagerung über den auf dem Produktetikett angegebenen Zeitraum hinaus bedeutet nicht

notwendigerweise, dass die Ware unbrauchbar ist.

Eine Überprüfung der für den jeweiligen Einsatzzweck erforderlichen Eigenschaftswerte ist jedoch in diesem Falle aus Gründen der Qualitätssicherung unerlässlich.

#### Produktdaten

Typische Allgemeine Eigenschaften	Prüfmethode	Wert
Aussehen		farblos, klar
Viskosität, kinematisch bei 25 °C	DIN 53019	ca. 10 mm <sup>2</sup> /s
Dichte bei 25 °C	DIN 51757	ca. 0,93 g/cm <sup>3</sup>
Brechungsindex bei 25 °C		1,403
Flammpunkt	ISO 2592	180 °C
Oberflächenspannung bei 25 °C		0,020 N/m
Zündtemperatur (Flüssigkeiten)	EN 14522	365 °C

Diese Angaben stellen Richtwerte dar und sind nicht zur Erstellung von Spezifikationen bestimmt.

Die in diesem Medium mitgeteilten Daten entsprechen dem derzeitigen Stand. Der Abnehmer ist von sorgfältigen Eingangsprüfungen im Einzelfall hierdurch nicht entbunden. Änderungen der Produktkennzahlen im Rahmen des technischen Fortschritts oder durch betrieblich bedingte Weiterentwicklungen behalten wir uns vor. Die in diesem Medium gegebenen Hinweise und Informationen erfordern wegen durch uns nicht beeinflussbarer Faktoren während der Verarbeitung, insbesondere bei der Verwendung von Rohstoffen Dritter, eigene Prüfungen und Versuche. Unsere Hinweise und Informationen entbinden nicht von der Verpflichtung, eine eventuelle Verletzung von Schutzrechten Dritter selbst zu überprüfen und gegebenenfalls zu beseitigen. Verwendungsvorschläge begründen keine Zusicherung der Eignung für einen bestimmten Einsatzzweck. Die Inhalte dieses Mediums sprechen Frauen und Männer gleichermaßen an. Zur besseren Lesbarkeit wird nur die männliche Sprachform (z. B. Kunde, Mitarbeiter) verwendet.

Managementsystem  
zertifiziert nach  
DIN EN ISO 9001 und  
DIN EN ISO 14001

WACKER® ist eine  
eingetragene Marke der  
Wacker Chemie AG.

Alle technischen, die  
Qualität und  
Produktsicherheit  
betreffenden Fragen richten  
Sie bitte an:

Wacker Chemie AG  
Hanns-Seidel-Platz 4  
81737 München, Germany  
info.silicones@wacker.com

[www.wacker.com](http://www.wacker.com)







---

# Literaturverzeichnis

Anmerkung: bei den mit einem Asterisk markierten Quellen handelt es sich um studentische Abschlussarbeiten, die im Rahmen dieser Dissertation angefertigt wurden. Sie sind im Anschluss an das Literaturverzeichnis gesondert aufgeführt.

- [Bey1992] M. Beyer, W. Boeck, K. Moller und W. Zaengl. *Hochspannungstechnik - Theoretische und praktische Grundlagen*. New York: Springer, 1992.
- [Bla2014] S. Blatt und V. Hinrichsen. „Mathematical model for numerical simulation of current density in microvaristor filled insulation materials“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2014), Seiten 1161–1170.
- [Bla2015] S. Blatt. *Untersuchungen zu einem möglichen Einsatz von Mikrovaristoren in der Isolation umrichter gespeister Antriebe*. Dissertation. Darmstadt, 2015.
- [Boe2001] B. Boettcher, G. Malin und R. Strobl. „Stress control system for composite insulators based on ZnO-technology“. In: *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. Atlanta, 2001, Seiten 776–780.
- [Chr2010] T. Christen, L. Donzel und F. Greuter. „Nonlinear resistive electric field grading part 1. Theory and simulation“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* (2010), Seiten 47–59.
- [Chr2013] T. Christen. „Characterization and robustness of HVDC insulation“. In: *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. Bologna, 2013, Seiten 238–241.
- [Cig2013] Cigré Working Group A3.17. *MO Surge Arresters - Stresses and Test Procedures*. Technical Brochure 544. 2013.
- [Cig2017] Cigré Working Group A3.25. *MO surge arresters - Metal oxide resistors and surge arresters for emerging system conditions*. Technical Brochure 696. 2017.
- [Cig2018] Cigré Working Group D1/B3.57. *Dielectric Testing of gas-insulated HVDC Systems*. Technical Brochure Draft (Versionsname: 2018 IWD 139\_TB Draft 03-V01\_05-2018), Stand: 26.04.2018.
- [Cla1999] D. R. Clarke. „Varistor Ceramics“. In: *Journal of the American Ceramic Society* (1999), Seiten 485–502.
- [Deb2011] J. Debus und V. Hinrichsen. „Microvaristor Filled Stress Grading Systems For High-Voltage Rotating Electrical Machines“. In: *22nd Nordic Insulation Symposium*. Tampere, 2011, Seiten 23–26.
- [Deb2011b] J. Debus, V. Hinrichsen und J. Seifert. „Improved Performance of Silicone Rubber Composite Insulators by Micro-Varistor Filled Components“. Paper-Nr. D-076. In: *17th International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover, 2011.

- 
- [dgg2015] „Glas - Multitalent für Energieanwendungen“. In: *dgg journal* 14 (3 2015), Seiten 12–16.
- [Don2011] L. Donzel, F. Greuter und T. Christen. „Nonlinear resistive electric field grading Part 2. Materials and applications“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* (2011), Seiten 18–29.
- [Don2012] L. Donzel, M. Hagemeister und F. Greuter. „Tailored Microvaristor Composites for Nonlinear Field Control“. In: 5. *RCC Fachtagung*. Berlin, 2012, Seiten 185–190.
- [Don2016] L. Donzel, M. Montenegro-Urtasin, M. Hagemeister und P. Rukwid. „ZnO stress grading tape for stator windings for electrical machines located at higher altitudes“. Paper-Nr. D1 - 107. In: *CIGRE Session*. Paris, 2016.
- [Eda1989] K. Eda. „Zinc oxide varistors“. In: *IEEE Electrical Insulation Magazine* (1989), Seiten 28–30.
- [Eri2015] G. Eriksson, H. Greijer und M. Pradhan. „High-field saturation behavior of field-grading materials“. In: *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2015, Seiten 72–75.
- [Fei2009] S. Feier-Iova. *The Behaviour of Water Drops on Insulating Surfaces Stressed by Electric Field*. Dissertation. Darmstadt, 2009.
- [Fow1928] R. H. Fowler und L. Nordheim. „Electron Emission in Intense Electric Fields“. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 119 (1928), Seiten 173–181.
- [Fre1926] J. Frenkel. „Über die Wärmebewegung in festen und flüssigen Körpern“. In: *Zeitschrift für Physik* (1926), Seiten 652–669.
- [Fre1938] J. Frenkel. „On Pre-Breakdown Phenomena in Insulators and Electronic Semi-Conductors“. In: *Physical Review* (1938), Seiten 647–648.
- [Fuj1989] H. Fujinami, T. Takuma, M. Yashima und T. Kawamoto. „Mechanism and Effect of DC Charge Accumulation on SF<sub>6</sub> Gas Insulated Spacers“. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* (1989), Seiten 1765–1772.
- [Gol2015] F. Goll. *Übertragungseigenschaften und Schutz vor äußeren Überspannungen von gasisolierten Rohrleitern*. Dissertation. München, 2015.
- [Gra2009] L. Graber. *Modellbasierte Bestimmung der SF<sub>6</sub>-Verlustrate in Gasisolierten Schaltanlagen*. Dissertation. Zürich, 2009.
- [Gre1990] F. Greuter und G. Blatter. „Electrical properties of grain boundaries in polycrystalline compound semiconductors“. In: *Semiconductor Science and Technology* (1990), Seiten 111–137.
- [Gre2004] F. Greuter, M. Siegrist, P. Kluge-Weiss, R. Kessler, L. Donzel, R. Loitzl und H. J. Gramespacher. „Microvaristors. Functional Fillers for Novel Electroceramic Composites“. In: *Journal of Electroceramics* (2004), Seiten 739–744.
- [Gre2015] M. Greb und J. Bauer. „Elektrisch-halbleitfähige Metalloxid-Pigmente mit nichtlinearen elektrischen Eigenschaften zum Einsatz in der Hochspannungstechnik“. In: 6. *RCC Fachtagung*. Berlin, 2015, Seiten 92–98.

- [Gua2005] Z. Guan, L. Wang, B. Yang, X. Liang und Z. Li. „Electric Field Analysis of Water Drop Corona“. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* (2005), Seiten 964–969.
- [Her2014] M. Hering, J. Speck, S. Grossmann und U. Riechert. „Investigation of particles on insulator surfaces in gas insulated systems under DC stress“. In: *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Des Moines, 2014, Seiten 70–73.
- [Her2016] M. Hering. *Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung*. Dissertation. Dresden, 2016.
- [Her2017] M. Hering, K. Juhre, M. Secklehner und V. Hinrichsen. „Requirements on solid insulating materials and gas-solid interfaces in compact HVDC gas-insulated systems“. Paper-Nr. 453. In: *20th International Symposium on High Voltage Engineering*. Buenos Aires, 2017.
- [Hus2017] R. Hussain und V. Hinrichsen. „Simulation of thermal behavior of a 320 kV HVDC cable joint with nonlinear resistive field grading under impulse voltage stress“. Paper-Nr. D1 - 021. In: *CIGRÈ Winnipeg 2017 International Colloquium & Exhibition*. Winnipeg, 2017.
- [Hus2018a] R. Hussain, F. Küchler und V. Hinrichsen. „Comparison of different dielectric characterization methods with TSC spectra of silicone rubber filled with carbon black nanofillers“. In: *2nd IEEE International Conference on Dielectrics*. Budapest, 2018, Seiten 960–965.
- [Hus2018b] R. Hussain, F. Küchler und V. Hinrichsen. „Dielektrische Eigenschaften von Silikonelastomer mit nanoskaligem Füllstoff“. In: *Fachtagung Polymere Isolierstoffe und ihre Grenzflächen*. Zittau, 2018, Seiten 43–48.
- [Jer2018] M. Jeroense, P. Bergelin, T. Quist, A. Abbasi, H. Rapp und L. Wang. „Fully qualified 640 kV underground extruded DC cable system“. Paper-Nr. B1 - 309. In: *CIGRE Session*. Paris, 2018.
- [Jon2015] E. Jonnson und L. Palmqvist. „Patent EP: 1975949 - Feldabstufungsmaterial“. 2015.
- [Jos2007] R. P. Joshi, G. Zhao, J. Song und V. K. Lakdawala. „Electro-thermal simulation studies for pulsed voltage induced energy absorption and potential failure in microstructured ZnO varistors“. In: *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007*. 2007, Seiten 631–634.
- [Jun1989] H. Jungblut, D. Hansen und W. F. Schmidt. „Ion-ion recombination in electronegative gases“. In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* (1989), Seiten 343–348.
- [Käm2011] S. Kämpfer und G. Kopatsch, Herausgeber. *ABB-Schaltanlagen-Handbuch*. Berlin: Cornelsen, 2011.
- [Kah1989] M. Kahle. *Elektrische Isoliertechnik*. Berlin: Springer, 1989.
- [Kao2004] K.-C. Kao. *Dielectric phenomena in solids*. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004.
- [Kie2000] Y. Kieffel, J. P. Travers und D. Cotteville. „Undoped polyaniline in the high voltage domain - Nonlinear behavior and aging effects“. In: *2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Victoria, 2000, Seiten 52–56.
- [Kit2013] C. Kittel. *Einführung in die Festkörperphysik*. München: Oldenbourg Verlag, 2013.
- [Koc2012] H. Koch. *Gas-insulated transmission lines (GIL)*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2012.

- 
- [Kre1995] F. H. Kreuger. *Industrial High DC Voltage*. Delft: Delft University Press, 1995.
- [Küc2017] A. Küchler. *Hochspannungstechnik. Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017.
- [Lan2013] S. Lang und C. Staubach. „Neue Generation einer resistiv-kapazitiven Potentialsteuerung ermöglicht optimiertes Design des Endenglimmschutzsystems - Teil A: Entwicklung und Herstellung“. In: *4. ETG-Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen*. Dresden, 2013, Seiten 122–127.
- [Lee2006] K. Lee, S. Cho, S. H. Park, A. J. Heeger, C.-W. Lee und S.-H. Lee. „Metallic transport in polyaniline“. In: *Nature* (2006), Seiten 65–68.
- [Lew2004] T. J. Lewis. „Interfaces are the dominant feature of dielectrics at the nanometric level“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2004), Seiten 739–753.
- [Lor2009] A. D. Lorenzi, L. Grando, A. Pesce, P. Bettini und R. Specogna. „Modeling of epoxy resin spacers for the 1 MV DC gas insulated line of ITER neutral beam injector system“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2009), Seiten 77–87.
- [Lut2009] B. Lutz und J. Kindersberger. „Influence of relative humidity on surface charge decay on epoxy resin insulators“. In: *9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Harbin, 2009, Seiten 883–886.
- [Lut2011] B. Lutz. *Einflussfaktoren auf die elektrische Feldverteilung in Isoliersystemen mit polymeren Isolierstoffen bei Gleichspannungsbelastung*. Dissertation. München, 2011.
- [Maz2013] G. Mazzanti und M. Marzinotto. *Extruded cables for high voltage direct-current transmission. Advances in research and development*. New York und Piscataway: Wiley und IEEE Press, 2013.
- [Mes1998] F. Messerer und W. Boeck. „Field optimization of an HVDC-GIS-spacer“. In: *1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Atlanta, 1998, Seiten 15–18.
- [Mes1999] F. Messerer. „High resistance surface coating of solid insulating components for HVDC metal enclosed equipment“. Paper-Nr. 4.63.S24. In: *11th International Symposium on High Voltage Engineering*. London, 1999.
- [Mes2002] F. Messerer, M. Finkel und W. Boeck. „Surface charge accumulation on HVDC-GIS-spacer“. In: *Conference record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Boston, 2002, Seiten 421–425.
- [Min1986] D. Minaguchi, M. Ginno, K. Itaka, H. Furukawa, K. Ninomiya und T. Hayashi. „Heat Transfer Characteristics of Gas-Insulated Transmission Lines“. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* (1986), Seiten 2–9.
- [Mor1997] P. Morshuis und M. Jeroense. „Space charge in HVDC cable insulation“. In: *IEEE 1997 annual report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Minneapolis, 1997, Seiten 28–31.

- [Mor2009] H. Morkoç und Ü. Özgür. *Zinc oxide - Fundamentals, materials and device technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [Mül2012] D. Müllegger. *Untersuchung und Simulation der elektrischen Eigenschaften von Mikrovaristormaterialien*. Dissertation. München, 2012.
- [Mün2016] H. Münstedt und Z. Starý. „Is electrical percolation in carbon-filled polymers reflected by rheological properties?“ In: *Polymer* (2016), Seiten 51–60.
- [Nak1983] K. Nakanishi, A. Yoshioka, Y. Arahata und Y. Shibuya. „Surface Charging On Epoxy Spacer At Dc Stress In Compressed SF6 GAS“. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (1983), Seiten 3919–3927.
- [Naz2016] M. H. Nazemi. *Experimental Investigations on Water Droplets on Polymeric Insulating Surfaces under the Impact of High Electric Fields*. Dissertation. Darmstadt, 2016.
- [Nit1991] T. Nitta und K. Nakanishi. „Charge accumulation on insulating spacers for HVDC GIS“. In: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* (1991), Seiten 418–427.
- [Pel2004] J. Pelto, M. Paajanen, K. Kannus, K. Lahti und P. Harju. „Nonlinear dc voltage-current characteristics of new polymeric composite materials based on semiconductive polyaniline emeraldine base filler“. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. Toulouse, 2004, Seiten 825–828.
- [Pie2017] E. Pierri, O. Binder, N. G. Hemdan und M. Kurrat. „Challenges and opportunities for a European HVDC grid“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2017), Seiten 427–456.
- [Rei2008] M. Reinhard. *Experimentelle Untersuchungen zum Einzelimpulsenergieaufnahmevermögen von Metalloxidwiderständen eingesetzt in Hochspannungsnetzen unter Berücksichtigung eines komplexen Fehlerkriteriums*. Dissertation. Darmstadt, 2008.
- [Rhy1997] J. Rhyner und M. G. Bou-Diab. „One-dimensional model for nonlinear stress control in cable terminations“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (1997), Seiten 785–791.
- [Roc2009] A. Rocks. *Einsatz von Metalloxid-Varistoren zum Überspannungsschutz pulsumrichter gespeister Drehfeldmaschinen*. Dissertation. Darmstadt, 2009.
- [Rüg2012] R. Rüger. „Halbleitende Metalloxid-Pigmente mit nichtlinearen elektrischen Eigenschaften“. In: *5. RCC Fachtagung*. Berlin, 2012, Seiten 117–122.
- [Sah1994] M. Sahimi. *Applications of percolation theory*. London: Taylor & Francis e-Library, 1994.
- [Sch1994] H. Schaumburg. *Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik - Keramik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1994.
- [Sch2017] J. Schulte-Fischedick, D. Ernesto Gómez Torres, N. Sotil-Bindels, F. Lehretz, J. Seifert, J. G. M. Montoya und Restrepo, J., C., G. „Optimized design of HV-insulators with respect to extreme pollution for the coastal areas of South and North America“. Paper-Nr. 153. In: *20th International Symposium on High Voltage Engineering*. Buenos Aires, 2017.



- [Sec2015] M. Secklehner und V. Hinrichsen. „Reduktion von Oberflächenladungen in Gleichspannungsanwendungen mittels elektrisch nichtlinearer Metalloxid-Pigmente“. In: 6. *RCC Fachtagung*. Berlin, 2015, Seiten 99–106.
- [Sec2017a] M. Secklehner, R. Hussain und V. Hinrichsen. „Tailoring of new field grading materials for HVDC systems“. In: *INSUCON 2017*. (Birmingham). 2017, Seiten 271–276.
- [Sec2017b] M. Secklehner, M. Hering und V. Hinrichsen. „Characterization of fillers for HVDC field grading materials“. Paper-Nr. D1 - 143. In: *CIGRÉ Colloquium*. (Winnipeg). 2017.
- [Sei2014] J. Seiler und J. Kindersberger. „Insight into the interphase in polymer nanocomposites“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2014), Seiten 537–547.
- [She1991] L. Shengtao, L. Fuyi und Z. Haien. „Polarization absorption currents and conduction response characteristics of zinc oxide varistors“. In: *3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Tokyo, 1991, Seiten 505–508.
- [Son2012] B. Sonerud, S. Josefsson, L. Boyer, P. Mirebeau, S. Lefevre, J. Castellon und P. Notingham. „Impulse and step voltage measurements on materials with non-linear V-I characteristic“. In: *Annual report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Montreal, 2012, Seiten 207–210.
- [Son2013] B. Sonerud, S. Josefsson, K. M. Furuheim, L. Boyer, C. Frohne, J. Pelto, M. Ketonen und O. Harkki. „Nonlinear electrical properties and mechanical strength of EPDM with polyaniline and carbon black filler“. In: *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. Bologna, 2013, Seiten 366–369.
- [Sta2013] C. Staubach und S. Lang. „Neue Generation einer resistiv-kapazitiven Potentialsteuerung ermöglicht optimiertes Design des Endenglimmschutzsystems - Teil B: Auslegung und Qualifikation“. In: 4. *ETG-Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen*. Dresden, 2013, Seiten 145–150.
- [Str2001] R. Strobl, W. Haverkamp, G. Malin und F. Fitzgerald. „Evolution of stress control systems in medium voltage cable accessories“. In: *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. Atlanta, 2001, Seiten 843–848.
- [Sun2017] J. Sun, M. Li, Z. Zhang, T. Xu, J. He, H. Wang und G. Li. „Renewable energy transmission by HVDC across the continent: system challenges and opportunities“. In: *CSEE Journal of Power and Energy Systems* (2017), Seiten 353–364.
- [Tan2005] T. Tanaka, M. Kozako, N. Fuse und Y. Ohki. „Proposal of a multi-core model for polymer nanocomposite dielectrics“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2005), Seiten 669–681.
- [Ten2015] M. Tenzer. *Funktionell gefüllte Isolierwerkstoffe für Hochfeld-Gleichspannungs-Isoliersysteme in kompakten gasisolierten Anlagen*. Dissertation. Darmstadt, 2015.
- [Ten2016] M. Tenzer, F. Goll, T. Magier und H. Koch. „Kompakte Übertragungsleitungen – Aktueller Entwicklungsstand der unterirdischen Übertragungstechnologie für hohe Wechsel- und Gleichspannung“. In: *VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik 2016*. Berlin, 2016, Seiten 538–543.

- 
- [Tuc2015] M. N. Tuzcek. *Experimentelle Untersuchungen zur Mehrfachimpulsbelastbarkeit von Metall-oxidvaristoren für Anwendungen in der elektrischen Energietechnik*. Dissertation. Darmstadt, 2015.
- [VDI2013] VDI-Wärmeatlas. Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [Vir1967] L.-g. Virsberg und P. Ware. „A New Termination for Underground Distribution“. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (1967), Seiten 1129–1135.
- [Voj1997] A. Vojta und D. R. Clarke. „Microstructural origin of current localization and “puncture” failure in varistor ceramics“. In: *Journal of Applied Physics* (1997), Seiten 985–993.
- [Vol2004] E. Volpov. „Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF<sub>6</sub> gas insulated systems“. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* (2004), Seiten 949–963.
- [Wei2008] M. A. Weimer, A. W. Weimer und W. Park. „Theory of conduction in ultrafast metal-insulator varistors“. Paper-Nr. 114516. In: *Journal of Applied Physics* (2008).
- [Wei2010] D. Weida, S. Bohmelt und M. Clemens. „Design of ZnO microvaristor end corona protection for electrical machines“. In: *Conference record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. San Diego, 2010.
- [Wen2018] T. Wendel, J. Kindersberger, M. Hering und K. Juhre. „Einflussfaktoren auf die Raumladungsdichteverteilung in Epoxidharzformstoff“. In: *1. Fachtagung Polymere Isolierstoffe und ihre Grenzflächen*. Zittau, 2018, Seiten 105–109.
- [Wes1991] B. Wessling. „Electrical conductivity in heterogenous polymer systems. V (1): Further experimental evidence for a phase transition at the critical volume concentration“. In: *Synthetic Metals* (1991), Seiten 1057–1062.
- [Wie2017] J. Wiener, V. Hinrichsen, F. Goll und K. Juhre. „Dielectric Properties of Fluorine Containing Insulating Gases for Gas Insulated Systems“. Paper-Nr. 476. In: *20th International Symposium on High Voltage Engineering*. August. Buenos Aires, 2017.
- [Win2015] A. Winter. *Elektrische Felder in Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung*. Dissertation. München, 2015.
- [Wu2013] X. Wu, N. Shu, H. Li und L. Li. „Thermal Analysis in Gas Insulated Transmission Lines Using an Improved Finite-Element Model“. In: *TELKOMNIKA* (2013), Seiten 458–467.
- [Ye2014] H. Ye, M. Clemens, J. Schulte-Fischedick und J. Seifert. „Investigation of electrical field grading of bushings with microvaristor filled epoxy resin components“. In: *2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*. Santa Fe, 2014, Seiten 153–156.
- [Ye2015] H. Ye. *Application of Non-Linear Microvaristor-Filled Materials in High-Voltage Devices and Algorithmic Optimization of High-Voltage Simulations based on Surrogate Models*. Dissertation. Wuppertal, 2015.

- 
- [Zav2013] L. Zavattoni, O. Lesaint und O. Gallot-Lavallee. „Surface resistance measurements on epoxy composites - Influence of surrounding gas, pressure, temperature, and analysis of the origin of measured currents“. In: *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. Bologna, 2013, Seiten 370–373.
- [Zav2014] L. Zavattoni. *Conduction phenomena through gas and insulating solids in HVDC Gas Insulated Substations, and consequences on electric field distribution*. Dissertation. Grenoble, 2014.

---

## Normen

- [DIN0276] DIN-VDE 0276 Teil 1000: *Starkstromkabel - Teil 1000: Strombelastbarkeit, Allgemeines, Umrechnungsfaktoren*. 1980, Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE).
- [DIN62631-3-1] DIN EN 62631-3-1: Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Isolierstoffe — Teil 3-1: Bestimmung resistiver Eigenschaften (Gleichspannungsverfahren) — Durchgangswiderstand und spezifischer Durchgangswiderstand — Basisverfahren (IEC 62631-3-1:2016). 2017, Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE).
- [DIN62631-3-2] DIN EN 62631-3-2: Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Isolierstoffe — Teil 3-2: Bestimmung resistiver Eigenschaften (Gleichspannungsverfahren) — Oberflächenwiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand (IEC 62631-3-2:2015). 2016, Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE).
- [IEC60060] IEC 60060-1: *High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*. Edition 3.0, 2010, International Electrotechnical Commission.
- [IEC60093] IEC 60093: *Methods of test for volume and surface resistivity of solid electrical insulating materials*. Edition 2.0, 1980, International Electrotechnical Commission. (2016 zurückgezogen und teilweise ersetzt durch IEC 62631-3-1:2016 und IEC 62631-3-2:2015)



---

## Eigene Publikationen

- [Ten2013] M. Tenzer, M. Secklehner und V. Hinrichsen: *Short and long term behavior of functionally filled polymeric insulating materials for HVDC insulators in compact gas insulated systems*. 23. Nordic Insulation Symposium, 9.-12. Juni 2013, Trondheim, Seiten 7-10.
- [Sec2013] M. Secklehner, M. Tenzer, V. Hinrichsen und D. Imamovic: *Funktionell gefülltes Epoxidharz für HGÜ-Anwendungen in kompakten Isoliersystemen*. 4. ETG-Fachtagung "Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen", 12.-13. November 2013, Dresden, Seiten 64-70.
- [Sec2015] M. Secklehner und V. Hinrichsen: *Reduktion von Oberflächenladungen in Gleichspannungsanwendungen mittels elektrisch nichtlinearer Metalloxid-Pigmente*. 6. RCC Fachtagung, 20.-21. Mai 2015, Berlin, Seiten 99-106.
- [Sec2017a] M. Secklehner, R. Hussain und V. Hinrichsen: *Tailoring of new field grading materials for HVDC systems*. INSUCON 2017, 16.-18. Mai 2017, Birmingham, Seiten 271-276.
- [Löw2017] J.-M. Löwe, M. Secklehner und V. Hinrichsen: *Investigation of surface charges on polymeric insulators and the influence of sessile water droplets*. INSUCON 2017, 16.-18. Mai 2017, Birmingham, Seiten 247-253.
- [Her2017] M. Hering, K. Juhre, M. Secklehner und V. Hinrichsen: *Requirements on solid insulating materials and gas-solid interfaces in compact HVDC gas-insulated systems*. International Symposium on High Voltage Engineering, 27. August - 01. September 2017, Buenos Aires, Paper-Nr. 453.
- [Sec2017b] M. Secklehner, M. Hering und V. Hinrichsen: *Characterization of fillers for HVDC field grading materials*. Cigré Colloquium, 30. September - 6. Oktober 2017, Winnipeg, Paper-Nr. D1 - 143.





---

## Betreute studentische Arbeiten

Die folgenden studentischen Arbeiten wurden im Rahmen dieser Dissertation am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt angefertigt und trugen zu den hier gezeigten Ergebnissen bei.

- [Gro2016\*] Mirco Gros, Bachelorarbeit Nr. 1982: *Weiterentwicklung der Messmethodik der Gleichstromleitfähigkeit von pulverförmigen Füllstoffen*, Darmstadt, 2016.
- [Hed2014\*] Sören Hedtke, Masterarbeit Nr. 1926: *Konstruktion eines Prüfstandes zur Untersuchung des Einflusses von Koaxialfeldern und Temperaturgradienten auf Stützisolatoren in gasisolierten Gleichstromleitungen*, Darmstadt, 2014.
- [Hus2015\*] Rashid Hussain, Masterarbeit Nr. 1950: *Optimierung der Untersuchungsmethodik zur Ermittlung der Leitfähigkeit von Isolierstoffen unter hoher Gleichspannungsbeanspruchung*, Darmstadt, 2015.
- [Kem2017\*] Michael Kempf, Bachelorarbeit Nr. 1987: *Untersuchung des Verhaltens elektrisch nichtlinear leitfähiger Feldsteuermaterialien bei Impulsspannungsbeanspruchung*, Darmstadt, 2017.
- [Mor2016\*] Johannes Morosow, Masterarbeit Nr. 1966: *Entwurf eines für die Feldsteuerung in HVDC-Isoliersystemen optimierten Feldsteuermaterials*, Darmstadt, 2016.
- [Prz2015\*] Thorsten Przybilla, Studienarbeit Nr. 1946: *Optimierung des Einsatzes funktionell gefüllter Isolierstoffe in Gleichfeld-Hochspannungsanwendungen mittels Feldsimulation*, Darmstadt, 2015.
- [Sch2015\*] Kevin Schmehl, Bachelorarbeit Nr. 1951: *Untersuchung eines neuen Herstellungsverfahrens für funktionell gefüllte Isolierstoffe für den Einsatz in Hochfeld-Gleichspannungsanwendungen und Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften*, Darmstadt, 2015.
- [Trau2017\*] Tobias Trautmann, Masterarbeit Nr. 1988: *Thermische Betrachtung und Simulation gasisolierter HGÜ-Leitungen bei Einsatz von Feldsteuermaterialien*, Darmstadt, 2017.



---

# Erklärungen laut Promotionsordnung

## **§ 8 Abs. 1 lit. c PromO**

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

## **§ 8 Abs. 1 lit. d PromO**

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde. In diesem Fall sind nähere Angaben über Zeitpunkt, Hochschule, Dissertationsthema und Ergebnis dieses Versuchs mitzuteilen.

## **§ 9 Abs. 1 PromO**

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

## **§ 9 Abs. 2 PromO**

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 05. Dezember 2018

Maximilian Secklehner